

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

**FACULTAD DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA,
SISTEMAS Y COMPUTACIÓN**

TESIS:

**“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y
ASIGNACIÓN DE CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO DE EQUIPOS
ELECTRÓNICOS”**

**Presentado como requisito para optar el título de:
INGENIERO ELECTRICISTA.**

**Presentado por:
JORGE ANDRES OSPINA RAMIREZ
Código: 4519690**

**Director:
M.SC. MAURICIO HOLGUÍN LONDOÑO.**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA**

2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su protección y bendiciones, que me ha dado para que cada día pueda superar las adversidades que se han presentado en mi vida. Y poder llegar a cumplir mis metas y obligaciones

A mis padres: Jorge Eliecer Ospina y María Nidia Ramírez por el apoyo incondicional y el amor, que han brindado todos los días de mi vida, les doy gracias por haberme inculcado ser una persona responsable y luchador para alcanzar metas y tener un buen éxito.

A mi familia: por el apoyo que me han dado, dedicando su tiempo para que yo pueda realizar las tareas que necesitara, y poder sobrepasar las dificultades encontradas.

A mis profesores que durante todo el transcurso de mi formación me han brindado su amistad igual que sus enseñanzas

Un agradecimiento a mi profesor y tutor: M.SC. Mauricio Holguín Londoño, por el apoyo brindado durante el proceso de la tesis

RESUMEN

El mundo actual gira alrededor de la electrónica, y toda esta cantidad de dispositivos que giran alrededor de nuestras vidas hace que dependamos cada vez más de su uso y confiabilidad.

Esta tesis dirige su esfuerzo de atención a conocer la confiabilidad de los sistemas electrónicos, que rodean nuestra vida cotidiana como su periodo de tiempo y sus condiciones de operación, para poder garantizar que el sistema trabaja sin ninguna falla, y poder determinar un periodo de operación factible que garantiza su operación efectiva hasta que culmina su periodo de confiabilidad o falla

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN	3
CAPITULO I	6
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA:	6
CAPITULO II	7
2. JUSTIFICACIÓN.....	7
CAPITULO III	8
3. OBJETIVOS.....	8
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	8
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
CAPITULO IV	9
4. INTRODUCCIÓN A LA CONFIABILIDAD	9
CAPITULO V	10
5. FACTORES FISICOS DE FALLA EN CIRCUITOS ELECTRONICOS.....	10
5.1. ELECTROMIGRACION.....	10
5.2. CORROSIÓN	11
5.3. TIEMPO DE RUPTURA EN EL DIELECTRICO ELEMENTOS (ULSI).....	12
5.4. INYECCIÓN DE ALTA TEMPERATURA A PORTADORA.....	12
5.5. CICLOS DE TEMPERATURA & THERMAL SHOCK.....	14
CAPITULO VI	14
6. FALLA EN LOS CIRCUITOS ELECTRONICOS DEBIDO A LOS DISEÑOS.....	14
6.1. FACTORES DE DISEÑO	14
6.2. COMPLEJIDAD	15
6.3. EL ESTRÉS.....	15
6.4. GENÉRICO CONFIABILIDAD (INHERENTE).....	16
CAPITULO VII	16
7. MODELOS	16
7.1. TEMATICA.....	16
7.2. TIPO DE MODELO PARA LA ELECTROMIGRACION	17

7.3.	TIPO DE MODELOS PARA LA CORROSIÓN	18
7.3.1.	MODELO EXPONENCIAL RECIPROCO	18
7.3.2.	MODELO (PECK) LEY DE POTENCIA	18
7.3.3.	MODELO EXPONENCIAL	19
7.3.4.	MODELO (LAWSON) <i>RH2</i>	19
7.4.	TIPO DE MODELO PARA TIEMPO DE QUIEBRE DEL DIELECTRICO	20
7.4.1.	MODELO E	20
7.4.2.	1/E – MODELO.....	20
7.5.	MODELO PARA INYECCIÓN DE CORRIENTE A ALTA TEMPERATURA.....	21
7.5.1.	MODELOS	21
7.5.2.	MODELO PARA TRANSISTORES DE CANAL - N	22
7.5.3.	MODELO PARA TRANSISTORES DE CANAL - P	22
7.6.	TIPO DE MODELO PARA TEMPERATURA CICLO & THERMAL SHOCK.....	22
7.6.1.	MODELO DE COFFIN-MANSON	22
7.6.2.	MODELO DE COFFIN-MANSON MODIFICADO.....	23
CAPITULO VIII	24
8.	FACTORES DE DISEÑO	24
8.1.	COMPLEJIDAD	24
8.2.	ESTRÉS AMBIENTAL.....	24
CAPITULO IX	25
9.	ASIGNACIÓN Y EVALUCION DE LA CONFIABILIDAD EN EQUIPOS ELECTRONICOS.....	25
9.1.	DEFINICIONES BÁSICAS	25
9.2.	TEORIA DE LA FIABILIDAD	25
9.3.	FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS	26
9.4.	FIABILIDAD DIAGRAMA DE BLOQUES	26
9.4.1.	SISTEMAS SERIE.....	28
9.4.2.	LOS SISTEMAS PARALELOS	31
9.4.3.	CONFIGURACIONES MIXTAS	33
9.4.3.1.	SISTEMAS DE LA SERIE-PARALELO.....	33
9.4.3.2.	SISTEMAS DE PARALELO-SERIE.....	34
9.4.4.	K-OUT – OF-N. SISTEMAS DE G.....	37
9.4.5.	SISTEMAS REDUNDANTES	41
CAPITULO X	46

10.	METODOLOGIAS PARA LA VALORACION Y ASIGNACION DE LA CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS Y SISTEMAS	46
10.1.	MÉTODO DE REDUCCIÓN	47
10.2.	MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN	49
10.3.	MÉTODO DE CONFIGURACIÓN DE CORTE MÍNIMO.....	52
10.4.	MÉTODO DEL ÁRBOL DE FALLOS.....	53
11.	METODOLOGIA Y PASOS PARA LA VALORACION Y ASIGNACION DE CONFIABILIDAD EN UN EQUIPO ELECTRONICO	58
11.1	SELECCIONAMOS UN CIRCUITO ELECTRONICO DE ESTUDIO	58
11.2	FRACIONAMOS EL CIRCUITO POR MEDIO DE CORTE MINIMO	58
11.3	LLEVAMOS CADA CORTE A SU EQUIVALENTE EN DIAGRAMA	59
11.4	HALLAMOS LA TASA DE FALLO DE CADA ELEMENTO SEGÚN SU MODELO	59
11.5	HALLAMOS LA FIABILIDAD DE CADA CORTE Y DEL CIRCUITO	59
12.	CONCLUSIONES.....	61
CAPITULO XII	62
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	62

CAPITULO I

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA:

Hace ya más de cuatro décadas que los sistemas electrónicos y sus aplicaciones revolucionaron la escena industrial y doméstica. Todo comenzó con los sistemas basados en tubos de vacío en los años 50 y prosiguió con el estado sólido hacia los años 60 y llegando en la actualidad a los Sistemas de Integración a muy Gran Escala (VLSI) [1].

La evolución de los equipos electrónicos fue arraigada gracias a sus componentes y su miniaturización, derivando en métodos heurísticos en la parte de diseño y desempeño.

En un principio se observó una gran cantidad de fallos debidos a deficiencias de diseño de los sistemas y en las aplicaciones específicas de los componentes. Posteriormente se detectó que factores externos, tales como subidas de tensión o fluctuaciones, estrés ambiental, etc. también afectaban la tasa de fallos. Igualmente se detectaron nuevos modos de fallo que afectan la confiabilidad cuando se presenta una corriente mayor a 10^6 A/cm^2 en las interconexiones de los circuitos, debido principalmente a la electromigración, óxido o descomposición, temperatura y efectos de transporte [2].

Las tasas de fallos en un circuito dependen de tres factores: complejidad del circuito, estrés (factores externos del ambiente, como temperatura, humedad, uso, etc.), y la confiabilidad de los componentes utilizados [3].

Estos hechos plantean un desafío a los especialistas en el estudio de la confiabilidad, para idear nuevos métodos de predicción, con más eficiencia, y que proporcione una compensación adecuada a los mecanismos de falla asociados a dicho dispositivo de estudio [2].

Ahora la industria electrónica de estado sólido, se enfrenta a la presión implacable para mejorar el rendimiento y la funcionalidad reduciendo tiempo y costo para el diseño y desarrollo de un dispositivo. Dado que sus tamaños están en rangos o escalas manométricas, el ciclo de vida de los sistemas se reduce drásticamente con la cantidad de componentes y la tasa de fallo es más vulnerable y corta [4].

Las presiones tecnológicas de la industria, debido a la miniaturización de los elementos electrónicos, como transistores por chip, no pueden darse el lujo de depender de las piezas que conforman el diseño para circuitos más sofisticados, ya que toda la industria busca diseñar microcircuitos que tengan una vida útil de 3 a 7 años, y que tengan una confiabilidad de alta calidad y costos bajos, este ítem de costos es un gran problema debido a que entre más eficiencia o confiabilidad debe tener el dispositivo, mas es su costo y tiempo de construcción. Desde su diseño se debe conocer la vida útil de un elemento o sistema [4].

Para mirar la confiabilidad, hay que mirar los problemas que enfrentan los equipos electrónicos llevando el dispositivo a un tiempo llamado “*ciclo de vida* “. Para hallar un determinado ciclo se tiene en cuenta delimitaciones como la electromigración, que afecta las capas de aluminio y cobre que se encuentran en el circuito, la corrosión, que afecta la intensidad de corriente que pasa entre los elementos, la soldadura, las fallas ambientales y el estrés ambiental (temperatura, oxidación, etc.) [2].

CAPITULO II

2. JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial el crecimiento de la tecnología y los avances en electrónica ha permitido sistemas electrónicos más complejos y desarrollados, debido a lo anterior el hombre por su necesidad de dar un mejor funcionamiento debe tener en cuenta los factores más importantes y necesarios para la vida útil de los equipos, que son la confiabilidad y la disponibilidad.

Se debe establecer la tarea de crear una base fundamental de seguridad en todos los equipos electrónicos empleados, ya que en gran parte de la vida el hombre está sometido

en una vida “*electrónica, digital*”. Se hace importante que todos estos equipos estén evaluados y asegurados por métodos establecidos de la confiabilidad.

Se infiere lo importante que es tener un método o guías que involucren estudios de confiabilidad, debido a que a medida que la tecnología aumenta, también lo debe hacer su sistema de confiabilidad, seguridad y disponibilidad.

Para hacer un estudio de análisis de confiabilidad y disponibilidad de un sistema, se debe de tomar muchos tipos de exámenes para determinar cuan confiable es el producto. Todo esto deriva en un estudio de las metodologías y aplicaciones que se usan para dicha tarea mirando sus resultados y ver su grado de confianza, por lo tanto, se puede obtener un estudio mucho más eficiente de los métodos dirigidos a los elementos, dando como resultado un mejor manejo de confiabilidad.

Debido a que los costos son altos para mejorar el rendimiento de un equipo, la ingeniería asume el tema de la confiabilidad con mucho más rigor, esto asegura que un producto realizará su misión con éxito. Aplicando las metodologías a los elementos que cumplen fusiones o tareas específicas, como por ejemplo sistemas de mando y control, sistemas en aeronaves, equipos militares, y en general sistemas que deban tener una alta confiabilidad y disponibilidad, se debe disponer de una metodología eficiente que permita por medio de cálculos estadísticos y determinísticos mostrar cuan confiable es un equipo y su costo.

Como ahora los elementos que conforman estos sistemas son cada vez más pequeños dando un grado de complejidad a los diseños del circuito, se hace un estudio de estos componentes según su conexión, usos y tareas que realizan, para satisfacer el éxito de su función.

Desde lo expuesto previamente se hace necesario que en todos los elementos de un circuito se deba realizar estudios para determinar el ciclo de vida. Posteriormente con el estudio realizado establecer su confiabilidad con un margen de certidumbre.

CAPITULO III

3. OBJETIVOS

3.1.OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar una metodología para valorar y asignar confiabilidad en las etapas de diseño y evaluación de un equipo electrónico.

3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un levantamiento del estado del arte en cuanto a los factores principales que influyen y determinan la confiabilidad para el diseño de equipos electrónicos.
- Determinar las principales teorías y técnicas estadísticas y/o estocásticas para realizar estudios de asignación y evaluación de confiabilidad en sistemas electrónicos.
- Establecer una metodología para la valoración y asignación de la confiabilidad en equipos electrónicos.

CAPITULO IV

4. INTRODUCCIÓN A LA CONFIABILIDAD

Debido al alcance de la tecnología y nuevas invenciones del hombre surge la necesidad de manejar un concepto más amplio de lo que es la confiabilidad.

En términos técnicos: se define como la probabilidad de que un producto o sistema realice su función sin tener fallo alguno en un tiempo estimado bajo unas condiciones preestablecidas.

No es suficiente que un sistema cumpla con especificaciones y criterios de calidad preestablecidas, sino que además tenga un buen desempeño durante su vida útil es decir sea confiable, la confiabilidad es calidad en el tiempo.

Las razones de estudio de la confiabilidad de productos son las siguientes:

Determinar el tiempo hasta el cual se espera que falle un sistema, debido a los elementos que conforman el sistema. Esto es útil para determinar tiempos de garantía apropiados, así como sus costos.

Encontrar un tiempo al cual se espera que sobreviva un sistema $1 - p$ dada de los productos en operación. Es una estimación de la confiabilidad de los productos.

Determinar la propensión a fallar que tienen el producto en un tiempo dado. Para comparar dos o más diseños o procesos, o lo que se publicita por un proveedor.

Dado que un artículo ha sobrevivido un tiempo T_0 , encontrar la probabilidad de que sobreviva un tiempo T adicional. Para planear el reemplazo de los equipos.

Los puntos anteriores se pueden hacer de manera comparativa para diferentes materiales, proveedores o modos de falla.

Las informaciones para los estudios de confiabilidad tienen diferentes denominaciones: datos de tiempos de vida, datos de tiempos de falla, datos de tiempo a evento, datos de degradación, etc.

Entre las características que tienen los estudios de confiabilidad se encuentran los siguientes:

Los tiempos de falla son positivos con comportamiento asimétrico y sesgo positivo, por tanto, las distribuciones para modelar estos tiempos de falla son la *Weibull*, *lognormal*, *exponencial* y *gamma*, la distribución normal casi no se utiliza.

Mientras que en estadística lo que interesa son los parámetros de la población media y desviación estándar, en la confiabilidad lo que interesa son las tasas de falla, las probabilidades de falla y los cuantiles. Un cuantil es el tiempo T_p hasta el cual se espera que falle una proporción p de artículos.

Para tener datos, es necesario tener datos a través de pruebas las que en algunas ocasiones son costosas.

A veces el tiempo para observar las fallas es muy extenso y es necesario acortar el tiempo de prueba, dando lugar a observaciones censuradas.

Normalmente se requiere extrapolar los resultados, por ejemplo, al estimar la tasa de falla a las 10,000 horas con pruebas de funcionamiento durante 1,000 horas.

Cuando es necesario acortar el tiempo de prueba se pueden hacer pruebas de vida acelerada utilizando condiciones estresantes.

La confiabilidad en los componentes electrónicos viene siendo establecida desde hace años, ya que se ha visto sometida a formar parte de sistemas mucho más complejos, debido a que, en la sociedad general y compañías, deben de contar con un sistema confiable para poder ofrecer servicios, productos, etc.

Con mucha más eficiencia para poder mantenerse en un mercado competitivo.

Durante hace décadas se determinó que gran parte de la sociedad depende de la tecnología y debido a esto se vio obligado a establecer estudios de confiabilidad de los componentes electrónicos, realizando estudios y verificando modelos matemáticos y estadísticos, que le determinen el ciclo de vida dependiendo de sus componentes y usos.

CAPITULO V

5. FACTORES FISICOS DE FALLA EN CIRCUITOS ELECTRONICOS

5.1.ELECTROMIGRACION

Es producido por el intercambio de movimiento entre los electrones portadores y la corriente presentada en el metal, provocando agujeros microscópicos que con el pasar del tiempo siguen aumentando hasta que la pista por donde fluye la corriente se interrumpe.

Hay restricciones y limitaciones para las pistas de los circuitos electrónicos como para los Contactos de los elementos que conforman el circuito electrónico.

La electromigración está asociada con las pistas, y contactos, de manera diferente por lo tanto cada caso debe ser investigado por separado, ya que tienen características diferentes, por ejemplo.

1. Las pistas pueden mostrar diferentes tipos de degradación, en dirección al flujo de corriente de electrones (M_1 a M_2 frente a M_2 a M_1), donde M_1 y M_2 son las capas metálicas de las pistas
2. A través de la tasa de degradación del material y número de pistas y su diseño
3. Los contactos defectuosos, hacen que se produzca el aumento de la resistencia metálica para una pista.
4. Si se descuida el calentamiento espontáneo, es otro factor que influye debido a la densidad de corriente, se puede observar bajo alta condiciones de ensayo del dispositivo.

5.2.CORROSIÓN

La corrosión se produce en los dispositivos electrónicos debido a que son construidos con aluminio o aleaciones de aluminio, con pequeños porcentajes de metalización de cobre y silicio. Llevando los elementos del dispositivo y pistas al efecto de la corrosión y por lo tanto al fracaso. La corrosión se produce en la metalización, debido a que está en presencia de humedad y contaminantes.

Los fallos en la corrosión se suelen clasificarse como una de las principales fallas de los circuitos electrónicos y esta se divide en dos grupos: la corrosión de **unión-pad** o (**corrosión interna**). y la corrosión **Bond pad** o (**corrosión en el adaptador de conexión**), esta es la más común debido a la exposición ambiental porque que no cubre la metalización en los lugares que se establece el adaptador de conexión. Y la Corrosión interna (interno al chip, lejos de las zonas terminales de soldadura) se atribuye a la debilidad o daños en la matriz de pasivación, permitiendo la humedad llegue a la metalización.

Hay tres pruebas estándar que en la industria la utilizan para acelerar los mecanismos de falla de corrosión

1. 85/85 (85 ° C y 85% de humedad relativa)

2. autoclave (o una olla a presión, la presión por lo general 2 atmósferas absolutas)
3. HAST (Prueba de esfuerzo altamente acelerado) -típicamente 85% de humedad relativa con la presión de vapor mayor a presión ambiente

5.3.TIEMPO DE RUPTURA EN EL DIELECTRICO ELEMENTOS (ULSI)

El tiempo de ruptura dieléctrica es uno de los mecanismos de falla más importante en los dispositivos **ULSI. (Ultra Large Scale Integration)** La falla sucede en el dieléctrico cuando en una trayectoria conductora se forma una ruptura en el dieléctrico provocando un cortocircuito, entre el ánodo y el cátodo dañando el dispositivo. Los dos modelos ampliamente utilizados para describir **TDDDB (Time-Dependent Dielectric Breakdoun)** o tiempo de ruptura del dieléctrico, es mostrado por el (modelo - E) y modelado con la corriente por (modelo - $1 / E$).

Restricciones y Limitaciones

Estos modelos están destinados a aplicarle 40A al S_iO_2 (óxido de silicio) con un espesor mayor de aproximadamente (4 nm).

La precisión de estos modelos para capas más delgada de (óxido de silicio) es desconocido.

Recientemente, varios estudios **TDDDB** / probados a largo plazo mostraron que los datos **TDDDB** fueron descritos de manera más eficaz por el (Modelo- E) que el (modelo $1 / E$).

El (modelo-E) se basa ahora fundamental mente en los parámetros físicos y encaja al TDDDB de manera más eficaz en los datos del modelo $1 / E$

Un buen ajuste al modelo E basado en parámetros físicos y exactamente expuestos bajo un campo a largo plazo, los datos TDDDB sugiere que el campo eléctrico es el principal factor dominante de la degradación, y que el estrés producido por la corriente no es relevante

5.4.INYECCIÓN DE ALTA TEMPERATURA A PORTADORA

La inyección de calor a alta temperatura a la portadora describe el fenómeno por el cual los portadores obtienen suficiente energía para ser inyectado en el óxido de puerta en los **MOSFET** [1-9]. Esto ocurre cuando los portadores al moverse a lo largo del canal de un

MOSFET experimentan ionización. El daño puede ocurrir en la interfaz, dentro del óxido o dentro del espaciador del flanco. El estado de la interfaz de generación y captura de carga inducida por este, da como resultado que los parámetros de degradación del transistor aumenten y se puede observar la degradación de la frecuencia de conmutación dando como resultado fallas de funcionamiento.

Las Restricciones Y Limitaciones

La degradación inducida por el calor a alta temperatura a la portadora **HCI** por sus siglas en inglés (**HOT CARRIER INJECTION**) para estos modelamientos en el transistor se hace por medio de picos de corriente en el sustrato-actual para los transistores de canales-N, y se realizan los picos de corriente en la compuerta para los transistores de canales-P, tener en cuenta que estos modelos se realizan para los transistores $> 0.25\mu m$.

Para transistores menores a $0.25\mu m$ de canal-P, la corriente de excitación tiende a disminuir como **NMOS** después de un estrés por el fenómeno de portadora a alta temperatura.

Para estos transistores menores a $0.25\mu m$ de canal-P, en el peor de los casos el fin del ciclo de vida se produce cuando la máxima tensión de corriente permitida rompe el sustrato del transistor. La tasa de falla **TF** es lo mismo para los transistores de canal **N**, La intensidad de las corrientes de los transistores de canal **N** tiende a disminuir después de **HCI**.

Una fuga en un estado inactivo de un transistor puede incrementarse gramáticamente [8], especialmente para altas corriente de arranque, en dispositivos de canales-P. Induciendo a la degradación del transistor, un Modelado de degradación inducida por **HCI** para el transistor parece ser exacta, pero la extrapolación de la degradación del transistor a nivel de degradación del circuito es incierta y debería ser el foco de los esfuerzos de investigación futura.

Existe una creciente evidencia de que la física del transistor para modelamientos de **HCI** puede estar comenzando a cambiar en $0.25\mu m$ y más pequeño, un gran cambio bajo condiciones de un peor estrés de **HCI**

Las evaluaciones de **HCI** casi siempre son realizadas en las estructuras de prueba más que productos terminados, y hechas bajo condiciones **DC**, así la vida útil calculada debe ser considerada una figura de mérito para la comparación de proceso.

Un corto "de por vida" observada con las estructuras de prueba no implica el rendimiento inaceptable del producto bajo condiciones **AC**.

Por lo general, la degradación de **HCI** causa una reducción de velocidad en el circuito propio, en lugar de un fallo catastrófico, aunque claramente una reducción de velocidad bastante grande puede causar fallo del dispositivo.

Para productos donde el sustrato o la corriente de la puerta es desconocido, puede haber una gran aceleración de la tensión porque la corriente en la puerta y el sustrato actual reaccionan exponencialmente al campo eléctrico.

Ha habido informes de que la temperatura que es dependiente de la corriente que pasa por el sustrato actual del transistor tiene una energía de activación positiva cuando V_{cc} es menor que 2,5V. Este modelo que estudia la dependencia de la temperatura para valores de V_{cc} inferiores a los 2,5V está aún bajo investigación.

5.5.CICLOS DE TEMPERATURA & THERMAL SHOCK

Las Fallas de fatiga pueden ocurrir en los dispositivos **ULSI** debido al choque térmico y a los ciclos de temperatura. Daños permanentes se acumulan durante los ciclos térmicos, acumulándose cada vez que el dispositivo se somete a un ciclo normal de encendido y apagado. Tales ciclos pueden inducir una tensión que tiende a debilitar materiales [1-9] y puede causar un número de diferentes tipos de fallos, incluyendo

Dieléctrico/película delgada que tiende a agrietarse y levantarse

Enlace roto, fractura de la soldadura entre el cable y el empalme de la pista.

Las restricciones y limitaciones

"Linealidad" se asume, un modelo de parámetros constantes en un rango de interés (estrés vs aplicación cliente) son métodos alternativos necesarios para estimar una confiabilidad (AF o ajustes) bajo ciertas condiciones tales como:

Si la temperatura del ciclo alcanza la temperatura crítica, por ejemplo T_g (temperatura de transición que vítrea el polímero). Si una característica del material que conforma el circuito cambia drásticamente sobre la gama de temperaturas sometidas por el estrés. Por ejemplo, la tasa de plomo en la soldadura tiene cambios substanciales cerca de la temperatura crítica, esto afectará el dispositivo llevándolo a un fallo en un determinado tiempo

CAPITULO VI

6. FALLA EN LOS CIRCUITOS ELECTRONICOS DEBIDO A LOS DISEÑOS

6.1. FACTORES DE DISEÑO

Es el factor más importante debido a que los componentes de fabricación de un circuito electrónico conllevan a un buen desempeño y confiabilidad, según la calidad de los elementos y el tipo de diseño que el aparato electrónico tenga.

Debe decirse que muchas fallas de campo no son debido al patrón clásico de error aleatorio discutido aquí como las fallas de electromigración, corrosión, estrés ambiental, etc. pero las deficiencias en el diseño y la aplicación de los componentes, son factores que se deben de tenerse en cuenta para la fabricación de un producto confiable.

La tasa de fallo del equipo depende de tres factores:

- **Complejidad**
- **Estrés**
- **Confiabilidad (Genérico) inherente de los componentes utilizados**

6.2.COMPLEJIDAD

Mantener las cosas simples – entre que un conjunto de circuitos sea más complejo tiende a tener una falla más fácil. Esto no es debido a las deficiencias del diseño personal, sino a la cantidad de componentes resultantes que componen el circuito. Cada componente utilizado contribuirá a una probabilidad de falla de un equipo.

6.3.EL ESTRÉS

En equipos electrónicos, los factores más predominantes son la temperatura, voltaje, vibración y aumento de la temperatura debido a la corriente. Debe considerarse el efecto de cada uno de estos factores de estrés en cada uno de los componentes. Para lograr una buena confiabilidad, diversos factores de reducción tienen que aplicarse a estos niveles de estrés. La reducción para estos factores, se debe de mirar y estudiar con cuidado debido a que llegamos al asunto de costo y tamaño.

Hay que tener gran cuidado y atención al detalle, es necesario poder reducir los factores de estrés lo más lejos posible. Por ejemplo, el diseño debe ser tal que los componentes que manejen calor se mantengan lejos de otros componentes que pueden cambiar sus propiedades de diseño debido a la alta temperatura y alterar poco a poco su funcionamiento ideal, estos elementos generadores de calor hay que refrigerarlos adecuadamente.

Barreras térmicas se utilizan donde hay componentes que sufren un estrés térmico la ventilación es necesaria y adecuada, esto debe ser calculado. La importancia de estas disposiciones de ventilación para prevenir el exceso de aumento de temperatura debido al calor es muy importante ya que la tasa de fracaso de algunos componentes se duplicará para un aumento de 10 ° C de temperatura. Tenga en cuenta que disminuye el tamaño de una unidad sin aumentar su eficiencia hará más calor y por lo tanto menos fiables.

6.4.GENÉRICO CONFIABILIDAD (INHERENTE)

Fiabilidad inherente se refiere al hecho de que los condensadores de película son más confiables que los condensadores electrolíticos, los componentes tienen que ser seleccionados cuidadosamente para evitar los tipos con las tasas de fracaso genérico más alta. Aquí podemos observar que representan esos elementos con mejor fiabilidad, hay un comercio de costos altos - componentes más confiables son generalmente más caros.

CAPITULO VII

7. MODELOS

7.1.TEMATICA

Las fallas más comunes como se mencionó anterior mente en el capítulo V, VI son la: electromigración, corrosión, tiempo de quiebre del dieléctrico, inyección de corriente a alta temperatura, temperatura y descarga eléctrica, factores de diseño, complejidad, estrés ambiental, (humedad, polvo, etc.) confiabilidad de componentes utilizados.

En este documento se aplica la siguiente nomenclatura para las ecuaciones y modelos:

Explicación de los símbolos, variables y abreviaturas

TF = tiempo hasta el fallo

AF = Factor de aceleración = TF_{cond2} / TF_{cond1}

Ao, Bo, Co = proceso / constante dependiente del material o de los

Factores de escala

J = densidad de corriente

J_{crit} = crítico (umbral) densidad de corriente que debe ser

Sobrepasada antes de que se produzca el fracaso

N = densidad de corriente, sustrato exponente Humedad actual o relativa

E_a = energía de activación

k = Constante de Boltzmann = $8,62 \times 10^{-5} \text{ eV} / ^\circ K$

RH = humedad relativa en% (100% = saturada)

T = temperatura absoluta en Kelvin

FIT = Fallas-en-tiempo, expresan como fracaso por mil millones de horas de dispositivos

M_1 = primera capa de metal

M_2 = segunda capa metálica

$\langle j \rangle$ = densidad media de corriente

Q_{crit} = carga crítica para un evento leve de falla

e = carga de un solo electro

7.2.TIPO DE MODELO PARA LA ELECTROMIGRACION

$$TF = A0 (J - J_{Crit})^{-N} * \exp^{[Ea / kT]}$$

En este modelo: se calcula el tiempo de fracaso de un sistema electrónico debido a la electromigración, que surge en los componentes electrónicos y pistas metálicas.

Para modelar los efectos de la electromigración se debe de presentar lo siguiente:

La densidad de corriente (J) que pasa por el circuito debe ser mucho mayor que la densidad de corriente crítica J_{crit} que es sobrepasada antes de producirse el fracaso de la electromigración

J es mayor que la J_{crit} para producir el fracaso

El criterio para la falla será dependiente del producto, probablemente se define como el aumento en la resistencia máxima tolerable para el peor de los casos en la pista

J_{crit} : umbral crítico de corriente, y está relacionada inversamente con la longitud de la línea (pista) que se está evaluando en el circuito.

Esta relación de la pista y la densidad de corriente crítica esta evaluada por medio de la siguiente ecuación $J_{crit} \times L_{crit} = 6000 \text{ A/cm}$ - para aleaciones de Al (aluminio) por lo tanto el producto de $J * L$ es aproximadamente constante, recuerde que la longitud a la que nos referimos es la anchura de la pista.

Cuando la longitud (anchura) de la pista de prueba es ~ 60 micras, entonces J_{crit} es comparable con EM (Electromigración) normal, destacando densidades de corriente cerca de 1 MA / cm^2

En los sistemas que se componen en capas de metal o para aquellos con paso relativamente grueso (anchura de línea $> \sim 1$ micra) $N = 2$, que corresponde a un período de incubación, pero en general uno debe usar $N = 1$ para las tecnologías de sub-

micras de profundidad. Basta con destacar que se puede observar densidad exponencial de corriente aparente de $\sim 2 \times J_{crit}$ si se toma como cero.

$E_a = 0,5 \text{ a } 0,6 \text{ eV}$ para Al y Al con un pequeño porcentaje de silicio

$E_a = 0,7 \text{ a } 0,9 \text{ eV}$ para el aluminio puro o aleaciones de aluminio / cobre

Para ondas de corriente unipolar, J es la densidad de corriente promedio $\langle J \rangle$ [14-15].

En formas de onda bipolar una acción de recuperación "barrer-back" (barrido de regreso) se lleva a cabo y la densidad de corriente J efectiva es descrita por:

$J = (\langle J \rangle_+ - r) \langle J \rangle_-$, donde $\langle J \rangle_+$ es la media de los pulsos de polaridad positiva y $\langle J \rangle_-$ es el promedio de los pulsos de polaridad negativa. El factor de recuperación (r) tiene un valor de al menos 0,7

7.3. TIPO DE MODELOS PARA LA CORROSIÓN

Para extrapolar resultados de las pruebas aceleradas de corrosión a campo, y condiciones de uso, se utilizan comúnmente cuatro modelos, todos los cuales son modelos **Eyring**.

(Esos modelos hacen la suposición práctica de variables independientes, matemáticamente separables).

Los modelos utilizan un término llamado **RH** (humedad relativa ambiente). Y un término de voltaje aplicado con un factor de Arrhenius, basado en la temperatura. En la elección de los modelos depende en gran medida de la preferencia personal debido a que se carecen de datos por la alta gama de variación de temperatura, tensión, y RH, para discriminar un modelo del otro según la base de ajuste estadístico. Sin embargo, el modelo exponencial puede ser el más eficaz.

7.3.1. MODELO EXPONENCIAL RECÍPROCO

$$TF = C_o * \exp^{[b / RH]} * f(v) * \exp^{[E_{un} / kT]}$$

Dónde:

C_o = Factor de escala arbitraria,

$b = 300$

$E_{un} = 0,3 \text{ eV}$,

$f(v)$ = una función desconocida de la tensión aplicada

7.3.2. MODELO (PECK) LEY DE POTENCIA

$$TF = A_o * RH^N * f(v) * \exp^{[E_{un} / kT]}$$

Originalmente para la corrosión del aluminio, pero aplicado a otros mecanismos de falla con diferentes valores de N & E_{un} .

Donde:

A_o = Factor de escala arbitraria

$N = 2,7$

$E_{un} = 0,7 - 0,8 \text{ eV}$ (apropiado para la corrosión del aluminio con cloruros están presentes)

$f(v)$ = una función desconocida de la tensión aplicada

7.3.3. MODELO EXPONENCIAL

$$TF = B_o * \exp^{[(-a)*RH]} * f(V) * \exp^{[E_a / kT]}$$

Dónde:

B_o = Factor de escala arbitraria,

$a = 0,10$ a $0,15$ por% de humedad relativa,

$E_{un} = 0,7 \text{ a } 0,8 \text{ eV}$,

$f(v)$ = una función desconocida de la tensión aplicada

Una comparación bastante reciente de cuatro modelos favoreció el modelo exponencial con una "a" valor de desde 0,12 hasta 0,15.

7.3.4. MODELO (LAWSON) RH^2

$$TF = C_o * RH^2 * f(v) * \exp^{[E_{un} / kT]}$$

Dónde:

C_o = Factor de escala arbitraria, (valor típico 4.4×10^{-4})

RH = humedad relativa en% (100% = saturado),

$E_{un} = 0.64 \text{ eV}$,

$f(v)$ = una función desconocida de la tensión aplicada

7.4.TIPO DE MODELO PARA TIEMPO DE QUIEBRE DEL DIELECTRICO

7.4.1. MODELO E

En el modelo E, se puede observar que debido a la causa de un campo bajo (menor a 10mV / cm) se presenta la falla **TDDb**, por lo tanto, se debe de mejorar el campo en la unión térmica, en la interfaz de silicio-sílice. El campo E permite reducir la energía de activación necesaria para la rotura del enlace térmico y, Por lo tanto, aumenta exponencialmente la velocidad de reacción para el fracaso. El tiempo al fracaso, es inversamente proporcional a la velocidad de reacción, disminuyendo exponencialmente

$$TF = A_0 * \exp^{[-\gamma * E_{ox}]} * \exp^{[E_a / kT]}$$

Dónde:

A₀: Es el factor de escala arbitraria, dependiendo de los materiales y procesos.

γ : Son parámetros de aceleración del campo, dependiendo de la temperatura,

γ(T) = a/kT Donde “**a**” es el momento efectivo dipolar para la molécula **E_{ox}** es el campo eléctrico a través del dieléctrico, y es medido en **MV/cm**. Debe ser una tensión compensada debido a que formar una acumulación en la banda, pero no se necesita ninguna compensación si se forma una capa inversa. **E_{ox}** es el cociente de la tensión de compensación y **t_{ox}** el espesor del óxido, tenga en cuenta que **t_{ox}** debe ser medido físicamente o eléctricamente.

$$E_a = (\Delta H)_0 - a * E_{ox}$$

E_a = Es la energía de activación en (eV). **E_a**, puede ser independiente de la temperatura.

(ΔH) 0 = Es la activación de la entalpía para la ruptura del enlace en ausencia del campo eléctrico (~2.0 eV).

a = Es momento molecular efectivo de dipolo para el quiebre del dieléctrico evaluado en ~7.2 eÅ.

7.4.2. 1/E – MODELO

La causa de TDDB, incluso en campos bajos, se muestra que es debido a la corriente a través del dieléctrico por **Fowler-Nordheim** (F-N) de conducción. F-N inyecta electrones (desde el cátodo) provocando daños de ionización por impacto sobre el dieléctrico. Además, cuando estos electrones acelerados alcanzan el ánodo, los agujeros producidos por estos electrones pueden crear un túnel y por lo tanto causar daño formando hoyos en el dieléctrico. El tiempo para el fracaso está próximo cuando hay una dependencia exponencial en el campo eléctrico inverso, $1/E$:

$$TF = t_0(T) * \exp[G(T) / E_{ox}]$$

$t_0(T)$ = Es el pre factor dependiente de la temperatura, 1×10^{-11} sec

G = Es el parámetro de aceleración de campo, $\sim 350 \text{ MV/cm}$ con una pequeña dependencia de la temperatura

E_{ox} = Es el campo eléctrico a través del dieléctrico en MV/cm . Este campo debe ser compensado, debido a que provoca una tensión en el dieléctrico y produce un quiebre por la acumulación del campo, pero no se necesita ninguna compensación si se forma una capa de inversión. E_{ox} es el cociente de la tensión de compensación y el espesor de óxido, t_{ox} . Tenga en cuenta que t_{ox} debe ser eléctricamente o físicamente medido

7.5. MODELO PARA INYECCIÓN DE CORRIENTE A ALTA TEMPERATURA

7.5.1. MODELOS

En general, la degradación inducida por HCl puede ser descrito por:

$$\Delta p = A t^n$$

En donde:

P = es el parámetro de interés (V_t , g_m , I_{dsat} , etc.),

A = depende del parámetro del material

T = tiempo

n = exponente determinado empíricamente que es una función que hace hincapié en la tensión, la temperatura y a la longitud efectiva del canal del transistor.

7.5.2. MODELO PARA TRANSISTORES DE CANAL - N

Dispositivos de canal N utilizan un modelo Eyring (lo cual es tomado de la matemática práctica y las Variables independientes supuestas):

En donde:

$$TF = B(I_{sub})^N * \exp[E_a / KT]$$

B: Es el factor de escala arbitraria (función de los factores de propiedades como el perfil de dopaje, el espaciado de la pared lateral, dimensiones, etc.)

I_{sub} = Es la corriente pico en el sustrato durante el esfuerzo

N = 2 a 4, típicamente 3

E_a = -0.1 eV a -0.2 eV (nota E_a es negativo)

7.5.3. MODELO PARA TRANSISTORES DE CANAL - P

En donde:

$$TF = B (I_{gate})^{-M} \exp(E_a / kT)$$

B = factor de escala arbitraria (función de factores de las propiedades, como perfiles de dopaje, medidas de espacio de la pared lateral, etc.)

I_{gate} = corriente de puerta pico durante des estresante.

M = 2 a 4

E_a = -0.1eV a -0.2eV (tenga en cuenta este es un valor negativo de energía de activación)

Una "regla de oro", es que la corriente en el sustrato versus la dependencia de voltaje de los dispositivos de canal P es que actualmente la corriente pico en el sustrato se duplica por cada aumento de 0.5V en voltaje de la fuente-drenaje (VDS).

7.6.TIPO DE MODELO PARA TEMPERATURA CICLO & THERMAL SHOCK

7.6.1. MODELO DE COFFIN-MANSON

Para materiales dúctiles, datos de fatiga de bajo ciclo se describen por la ecuación de Coffin-Manson:

En donde:

$$Nf = A_0 [1 / \Delta \epsilon_p]^B$$

Nf = ciclos hasta el fallo

A_0 = una constante del material

$\Delta \epsilon_p$ = Rango de deformación plástica

B = una constante determinada empíricamente

Fatiga de bajo ciclo se define como una condición de estrés en el que cientos o miles de ciclos causan fracaso, mientras que la alta fatiga de ciclo requeriría millones de ciclos. El modelo de Coffin-Manson fue desarrollado originalmente para materiales dúctiles (Hierro y aleaciones de aluminio para aviones), pero que ha sido aplicado con éxito en materiales frágiles.

7.6.2. MODELO DE COFFIN-MANSON MODIFICADO

La ecuación estándar de Coffin-Manson funciona bien, incluso para los fracasos de materiales frágiles, donde el fracaso es dominado por un crecimiento en lugar de la simple deformación plástica. Sin embargo, durante un ciclo de temperatura, no todo el rango de temperatura ΔT puede inducir deformación plástica.

$$\Delta \epsilon_p \propto (\Delta T - \Delta T_0)^\beta$$

Por lo tanto, para los ciclos de temperatura con deformación plástica, la ecuación de Coffin-Manson se convierte en:

$$Nf = C_0 [\Delta T - \Delta T_0]^{-q}$$

En donde

Nf = número de ciclos hasta la rotura

C_0 = una constante dependiente de material de

ΔT = Todo el ciclo de rango de temperatura para el dispositivo

ΔT_0 = la porción del intervalo de ciclo de temperatura en la región elástica

q = el exponente de Coffin-Manson, un derivado empíricamente constante

CAPITULO VIII

8. FACTORES DE DISEÑO

Los factores de diseños son un parte supremamente importante debido que es la base fundamental da la calidad del circuito final.

Todo diseño que se tenga en proceso se debe tener en cuenta que depende del tipo de elemento a utilizar y sobre todo la calidad que suministra el proveedor de los elementos electrónicos sean resistencias, condensadores, inductancias, circuitos integrados, etc.

El proveedor de estos elementos tiene sus estudio de fallas de los elementos que diseña y cuantifica la probabilidad de fallo, igual mente estos elementos son diseñados para ambientes estándar, cuando se requiere para ambientes pesados la probabilidad de falla de estos elementos aumenta significativamente, en los modelos anteriores podemos observar que se tiene en cuenta las constantes de los materiales utilizados en la fabricación de los elementos y al ambiente donde serán utilizados (temperatura, polvo, humedad, etc).

Nota: para mirar la fiabilidad de estos elementos se puede mirar las fichas técnicas, esto ayuda para posteriores estudios y se puede tomar como base para que por un medio estadístico de fiabilidad podamos calcular una tasa de fallos del circuito electrónico según el método o modelo que deseamos aplicar

8.1.COMPLEJIDAD

La complejidad de un circuito afectara la tasa de fallo según sus elementos, conexiones, pistas, etc. Mantener las cosas simples o poco complejas aumenta la confiabilidad del circuito electrónico, esto hace un reto para la fabricación de circuitos electrónicos debido a que para realizar una tarea más compleja se necesitaran cada vez más que el circuito final conlleve más elementos electrónicos y por lo tanto la tasa de fallo sea mayor.

8.2.ESTRÉS AMBIENTAL

En equipos electrónicos, los factores más prominentes para generar una falla son la temperatura ambiente, vibración, polvo y aumento de la temperatura debido a la corriente.

Se debe de considerar el efecto de cada una de estos factores de falla en cada uno de los componentes. Para lograr buena confiabilidad, diversos factores de falla se tienen que aplicar a los elementos del circuito. Para encontrar una tasa de fallo lo menor posible y

en caso de querer mejorar la confiabilidad se debe de competir con precio debido a que mayor confiabilidad mayor es el precio para la elaboración del circuito ya que los elementos compuestos por el circuito para resistir la fatiga de estos factores de falla o estrés expuesto, son más caros y aumentan el costo final del circuito.

Al diseñar se debe de tener un gran cuidado y atención al detalle es necesario reducir tensiones térmicas lo más lejos posible. El diseño debe ser tal que los componentes que generen calor se mantienen lejos de otros componentes y poder refrigerarlos adecuadamente para prolongar su vida útil.

CAPITULO IX

9. ASIGNACIÓN Y EVALUCION DE LA CONFIABILIDAD EN EQUIPOS ELECTRONICOS

Referente a la metodología y para la valoración y asignación de la confiabilidad en los equipos miremos las teorías y técnicas estadísticas y/o estocásticas practicas operativas que, mediante el estudio de las leyes de ocurrencia de fallos, están dirigidos a resolver problemas de previsión, estimación y optimización de la probabilidad de supervivencia, duración de vida media y porcentaje de tiempo de buen funcionamiento de un sistema.

9.1.DEFINICIONES BÁSICAS

Fallo: Es toda alteración o interrupción en el cumplimiento de la función requerida.

Fiabilidad (de un elemento): Es la probabilidad de que funcione sin fallos durante un tiempo (t) determinado, en unas condiciones ambientales dadas.

Mantenibilidad: Es la probabilidad de que, después del fallo, sea reparado en un tiempo dado.

Disponibilidad: Es la probabilidad de que este en estado de funcionar (ni averiado ni en revisión) en un tiempo dado.

9.2.TEORIA DE LA FIABILIDAD

Hemos definido antes la FIABILIDAD como la probabilidad de que un elemento, conjunto o sistema funcione sin fallos, durante un tiempo dado, en unas condiciones ambientales dadas. Ello supone:

a) Definir de forma inequívoca el criterio que determina si el elemento funciona o no.

- b) Que se definan claramente las condiciones ambientales y de utilización y se mantengan constantes.
- c) Que se defina el intervalo t durante el cual se requiere que el elemento funcione.

9.3. FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS

Tratamos ahora de establecer la relación que liga la fiabilidad de un sistema complejo con la de sus componentes individuales.

La fiabilidad de un sistema no es otra que la probabilidad de ocurrencia del acontecimiento "NO HAY FALLOS", lo cual es, a su vez, resultado de una serie de acontecimientos más simples.

Las partes componentes del sistema se pueden comportar, desde el punto de vista de la fiabilidad de forma independiente o no.

El funcionamiento, desde el punto de vista de la fiabilidad, de un sistema se representa mediante diagrama de bloques adecuadamente conectados, de forma que cada bloque representa un elemento o subsistema.

9.4.FIABILIDAD DIAGRAMA DE BLOQUES

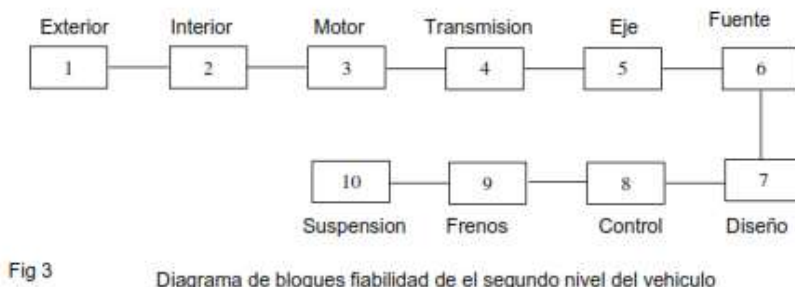
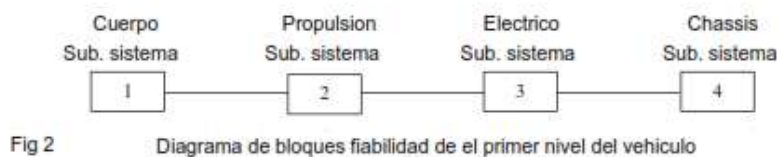
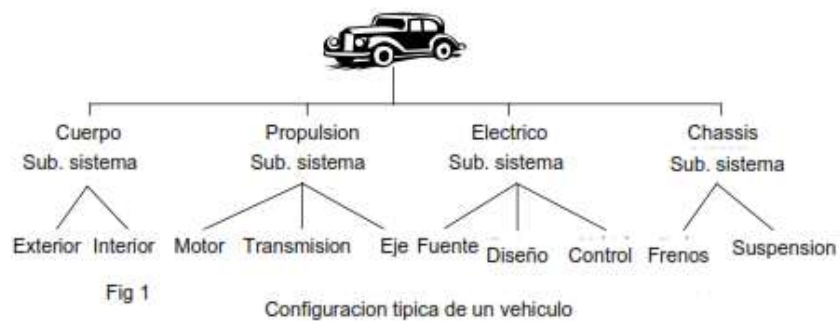
La fiabilidad de un diagrama de bloques es una representación gráfica de la conexión lógica de los componentes dentro de un sistema. Los elementos básicos de conexiones lógicas incluyen serie y en paralelo, de la que configuraciones de sistemas más complicados pueden ser generados, tales como los sistemas de votación series- paralelo y k-fuera de n sistemas.

En un diagrama de bloques de confiabilidad, los componentes son simbolizados por bloques rectangulares, que están conectados por líneas rectas de acuerdo con sus relaciones lógicas. Dependiendo de la finalidad de análisis del sistema, un bloque puede representar un nivel más bajo de componentes, un módulo, o un subsistema. Se trata como una caja negra.

El siguiente ejemplo ilustra la construcción de diagramas de bloques para mostrar la fiabilidad en diferentes niveles de un sistema.

El ejemplo muestra la configuración jerárquica de un automóvil que consta de un cuerpo, un tren de potencia, y subsistemas eléctricos y el chasis. Cada subsistema se divide adicionalmente en múltiples subsistemas de nivel inferior. Desde una perspectiva de fiabilidad, el automóvil es un sistema serie (que se examinan en la siguiente sección), que produce un error si uno o más subsistemas rompen.

DIAGRAMA DE BLOQUES FIABILIDAD DE UN VEHICULO



La fiabilidad del automóvil en el diagrama de bloques, representan los subsistemas de primer nivel, suponiendo que se conocen sus fiabilidades.

Figura 3 es un diagrama que ilustra los subsistemas de segundo nivel. Al comparar la figura 2 con la figura 3, vemos que la complejidad de un diagrama de bloques aumenta con el nivel de subsistema que representan. La fiabilidad en un diagrama de bloques para representar un automóvil típico contiene más de 12.000 bloques si cada bloque representa un componente o parte.

En la construcción de un diagrama de bloques, hay que tener en cuenta que la configuración física de los componentes al ser representados en serie o en paralelo no indican necesariamente las mismas relaciones lógicas en términos de fiabilidad. Por ejemplo, un motor de automóvil puede tener seis cilindros conectados en paralelo mecánicamente. Desde una perspectiva de fiabilidad, los seis funcionan cíclicamente, están en serie debido a que el motor se dice que ha fallado si falla uno o más cilindros. Para el desarrollo de un diagrama de bloques en un sistema a gran escala se representaría de esa manera

9.4.1. SISTEMAS SERIE

Se dice que es un sistema en serie, si el fallo de uno o más componentes dentro del sistema influyen para que de todo el sistema falle. En otras palabras, todos los componentes dentro de un sistema deben funcionar para que el sistema tenga éxito. Las figuras 2 y 3 muestran unos sistemas en serie de un automóvil en dos niveles jerárquicos. La fiabilidad de un sistema serie se puede calcular de la siguiente manera.

Supongamos que un sistema en serie consta de n componentes independientes entre sí. Aquí, la independencia mutua implica que el fallo de un componente no afecta a la vida de otros componentes. Nosotros usamos la siguiente notación: E_i es el caso de que el componente i es operativo, E el caso de que el sistema está en funcionamiento, R_i la fiabilidad del componente i , y R la fiabilidad del sistema.

Por definición, el buen funcionamiento de un sistema requiere de todos los componentes deben ser funcionales. A partir de la teoría de probabilidades, la fiabilidad del sistema es:

$$R = P_r(E) = P_r(E_1 * E_2 * \dots * E_n)$$

Debido a la hipótesis de la independencia, esto se convierte en

$$R = P_r(E_1) * P_r(E_2) * \dots * P_r(E_n) = \prod_{i=1}^n R_i \quad (9.1)$$

Si los componentes de n son idénticos con fiabilidad R_0 , la fiabilidad del sistema es

$$R = R_0^n \quad (9.2)$$

La ecuación (9.1) indica que la fiabilidad del sistema es el producto de fiabilidades de los componentes. Este resultado es desafortunado, debido a que la fiabilidad del sistema es menor que la fiabilidad de cualquier componente. Además, la fiabilidad del sistema disminuye rápidamente a medida que el número de componentes en un sistema aumenta. Las observaciones apoyan el principio de reducir al mínimo la complejidad de un diseño de ingeniería.

Consideremos un caso sencillo donde los tiempos hasta el fallo de n componentes en un sistema se modelan con la distribución exponencial. La función exponencial para la fiabilidad del componente i es $R_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, donde $-\lambda_i t$ es la tasa de fracaso del componente i . A continuación, a partir de (9.1), la fiabilidad del sistema se puede escribir como

$$R(t) = \exp\left[-t \sum_{i=1}^n \lambda_i\right] = \exp(-\lambda t) \quad (9.3)$$

Donde λ es la tasa de fallos del sistema y

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (9.4)$$

Mientras tanto al fracaso del sistema es

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (9.5)$$

La ecuación (9.3) indica que la vida de un sistema sigue la distribución exponencial si todos los componentes dentro del sistema son exponenciales y la tasa de fallo del sistema es la suma de todas las tasas de fracaso individuales. La ecuación (9.3) se utiliza ampliamente, y tal vez un mal uso, debido a su simplicidad. Por ejemplo, la norma MIL-HDBK-217F (EE.UU. departamento de Defensa, 1995) asume que todos los componentes tienen tasas de fracaso constantes y usan (9.3) para calcular la tasa de fallo del sistema.

Ejemplo 9.1: Consulte la Figura 2. Supongamos que el tiempo de vida del cuerpo, sistema de propulsión y subsistemas eléctricos y el chasis se distribuyen exponencialmente con $\lambda_1 = 5,1 \times 10^{-4}$, $\lambda_2 = 6,3 \times 10^{-4}$, $\lambda_3 = 5,5 \times 10^{-4}$ y $\lambda_4 = 4,8 \times 10^{-4}$ a prueba fallas por 1000 millas, respectivamente. Calcular la fiabilidad del vehículo a 36.000 millas y el kilometraje medio hasta el fallo.

SOLUCIÓN Sustituyendo los valores de $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ y λ_4 en (9.4) se obtiene

$$\begin{aligned} \lambda &= 5,1 \times 10^{-4} + 6,3 \times 10^{-4} + 5,5 \times 10^{-5} + 4,8 \times 10^{-4} \\ &= 16,75 \times 10^{-4} \text{ fallas por 1000 millas} \end{aligned}$$

La fiabilidad a 36.000 millas es $R(36.000) = \exp(-16,75 \times 10^{-4} \times 36) = 0.9415$. El kilometraje medio entre fallos (MTTF) se obtiene a partir de (9.5) como

$$MTTF = \frac{1}{16,75 \times 10^{-4}} = 597,000$$

Ahora vamos a considerar otro caso en los tiempos de fallo de n componentes en un sistema que se modelan con la distribución de Weibull. La fiabilidad con la función de Weibull de los componentes i es

$$R_i(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha_i} \right)^{\beta_i} \right]$$

Donde β_i y α_i son, respectivamente, el parámetro de forma y la vida característica del componente i . A partir de (9.1) es la fiabilidad del sistema

$$R(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \left(\frac{t}{\alpha_i} \right)^{\beta_i} \right] \quad (9.6)$$

A continuación, la tasa de fracaso $h(t)$ del sistema es

$$h(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\alpha_i} \left(\frac{t}{\alpha_i} \right)^{\beta_i-1} \quad (9.7)$$

La ecuación (9.7) indica que al igual que el caso exponencial, la tasa de fracaso del sistema es la suma de todas las tasas de fracaso individuales. Cuando $\beta_i = 1$, (9.7) se reduce a (9.4), donde $\lambda_i = 1/\alpha_i$. Si los componentes n tienen una forma común parámetro β , el tiempo medio hasta el fallo del sistema viene dada por

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{\Gamma\left(\left(\frac{1}{\beta}\right)+1\right)}{\left[\sum_{i=1}^n (1/\alpha_i)^{\beta}\right]^{1/\beta}} \quad (9.8)$$

Ejemplo 9. 2: Un circuito resonante consiste en una corriente alterna (Ac) de la fuente de alimentación, una resistencia, un condensador, y un inductor, como se muestra en la Figura 5 Desde la perspectiva de la fiabilidad, el circuito está en serie; el diagrama de bloques de fiabilidad es en la Figura 6. Los tiempos hasta el fallo de los componentes son

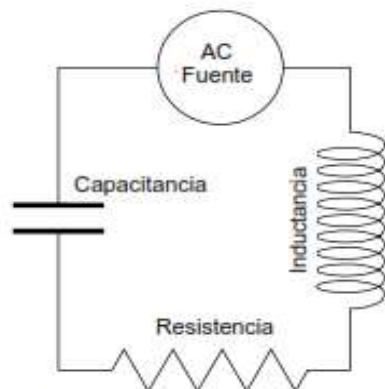


Fig 5 Circuito Resonante

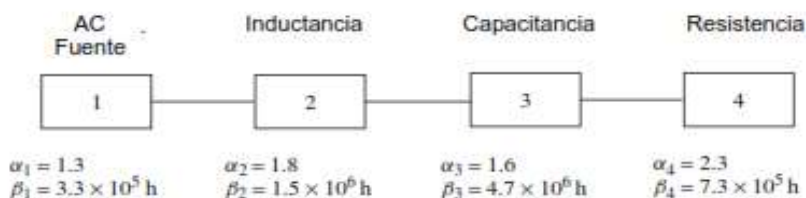


Fig 6 Diagrama de bloques circuitos resonantes

Con los siguientes parámetros de Weibull que se muestran en la Figura 6. Calcular la tasa de fiabilidad y fallo del circuito de a 5×10^4 horas.

SOLUCIÓN: Sustituyendo los valores de los parámetros de Weibull en (9.6) da

$$R(5 \times 10^4) = \exp \left[- \left(\frac{5 \times 10^4}{3.3 \times 10^5} \right)^{1.3} - \left(\frac{5 \times 10^4}{1.5 \times 10^6} \right)^{1.8} - \left(\frac{5 \times 10^4}{4.7 \times 10^6} \right)^{1.6} - \left(\frac{5 \times 10^4}{7.3 \times 10^5} \right)^{2.3} \right] \\ = 0.913$$

La tasa de fallo se calcula a partir de (9.7) como

$$h(5 \times 10^4) = \left[\frac{1.3}{3.3 \times 10^5} \left(\frac{5 \times 10^4}{3.3 \times 10^5} \right)^{1.3-1} - \frac{1.8}{1.5 \times 10^6} \left(\frac{5 \times 10^4}{1.5 \times 10^6} \right)^{1.8-1} - \frac{1.6}{4.7 \times 10^6} \left(\frac{5 \times 10^4}{4.7 \times 10^6} \right)^{1.6-1} - \frac{2.3}{7.3 \times 10^5} \left(\frac{5 \times 10^4}{7.3 \times 10^5} \right)^{2.3-1} \right] = 2.43 \times 10^{-6} \text{ fallas por hora}$$

9.4.2. LOS SISTEMAS PARALELOS

Se dice que es un sistema en paralelo si y sólo si se produce el fallo debido al fallo de todos los componentes dentro del sistema. En otras palabras, un sistema paralelo tiene éxito si uno o más componentes están en funcionamiento. Por ejemplo, el sistema de iluminación que consta de tres bombillas en una habitación es un sistema paralelo, porque solo se produce un apagón sólo cuando las tres bombillas se rompen. El diagrama de bloques fiabilidad del sistema de iluminación se muestra en la Figura 7. La fiabilidad de un sistema paralelo en general se calcula de la siguiente manera.

Supongamos que un sistema paralelo consiste en n componentes independientes entre sí. Nosotros usamos la siguiente notación: Ei es el caso de que el componente i es operativa;

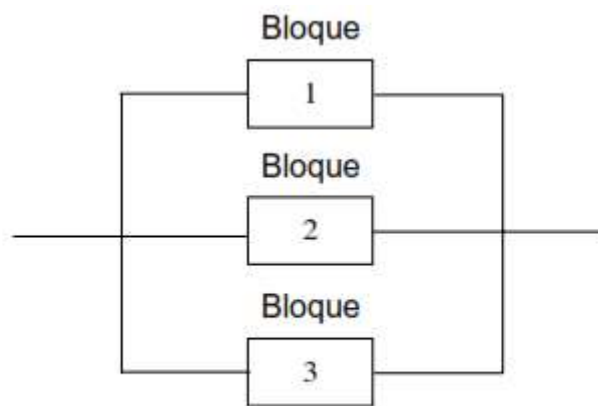


Fig 7

Diagrama de bloques sistema de iluminación

E el caso de que el sistema está en funcionamiento; \bar{X} el complemento de X , donde X representa Ei o E ; Ri la fiabilidad del componente i ; F la falta de fiabilidad del sistema (probabilidad de fallo); y R la fiabilidad del sistema. Por definición, todos los

componentes n deben fallar por un sistema paralelo al fracaso. De la teoría de probabilidades, la falta de fiabilidad del sistema es

$$F = P_r(\bar{E}) = P_r(\bar{E1} * \bar{E2} * \dots * \bar{En})$$

Debido a que $(i = 1, 2, \dots, N)$ son independientes entre sí, esta ecuación se puede escribir como

$$F = P_r(\bar{E1}) * P_r(\bar{E2}) * \dots * P_r(\bar{En}) = \prod_{i=1}^n (1 - Ri) \quad (9.9)$$

La fiabilidad del sistema es el complemento de la falta de fiabilidad del sistema: a saber,

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Ri) \quad (9.10)$$

Si a continuación, los componentes son idénticos, (9.10) se convierte en

$$R = 1 - (1 - R_0)^n \quad (9.11)$$

Donde R_0 es la fiabilidad de un componente. Si R se especifica de antemano como un objetivo, el número mínimo de componentes necesarios para lograr el objetivo

$$n = \frac{\ln(1 - R)}{\ln(1 - R_0)} \quad (9.12)$$

Si la vida de los componentes idénticos n se modela con la distribución exponencial con λ tasa de fracaso, (9.11) puede escribirse como

$$R(t) = 1 - (1 - \exp(\lambda t))^n \quad (9.13)$$

Mientras tanto al fracaso del sistema viene dada por

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \quad (9.14)$$

En contraste con un sistema en serie, la fiabilidad de un sistema en paralelo aumenta con el número de componentes dentro del sistema, como se indica en (9.10). Así, una configuración paralelo es un método para aumentar la fiabilidad del sistema y es a menudo implementado en los sistemas críticos para la seguridad, tales como aviones y naves espaciales. Sin embargo, el uso del método se limita a menudo por otras consideraciones, tales como el extra costo y el peso debido al aumento del número de componentes. Por ejemplo, en paralelo el diseño se utiliza muy poco para mejorar la fiabilidad del automóvil debido a su costo.

Ejemplo 9.3: Conforme a la Figura 7. Supongamos que el sistema de iluminación utiliza tres bombillas idénticas y que otros componentes dentro del sistema son 100%

fiabiles. Los tiempos hasta el fallo de las bombillas son Weibull con parámetros $\alpha = 1,35$ y $\beta = 35.800$ horas. Calcular la fiabilidad del sistema después de 8760 horas de utilizar. Si el objetivo de fiabilidad del sistema es 99,99% en este momento, el número de bulbos debe ser conectado en paralelo?

SOLUCIÓN Como la vida de las bombillas se modela con la distribución de Weibull, la fiabilidad de una sola bombilla después de 8760 horas de uso es

$$R_0 = \exp \left[- \left(\frac{8760}{35800} \right)^{1.35} \right] = 0.8611$$

Sustituyendo el valor de R_0 en (9.11) da la fiabilidad del sistema en 8760 horas

$R = 1 - (0.8611)^3 = 0.9973$. A partir de (9.12), el número mínimo de bombillas requerido para alcanzar 99,99% de fiabilidad se

$$n = \frac{\ln(1 - 0.9999)}{\ln(1 - 0.8611)} = 5$$

9.4.3. CONFIGURACIONES MIXTAS

Hay situaciones en las que las configuraciones serie y en paralelo se mezclan en un solo diseño del sistema, para alcanzar los requisitos funcionales o de fiabilidad. las combinaciones en forma serie-paralelo y paralelo-serie. Se discuten a continuación.

9.4.3.1. SISTEMAS DE LA SERIE-PARALELO

En general, un sistema de serie-paralelo se compone de n subsistemas en series con M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) componentes en paralelo en el subsistema i , como se muestra En la Figura 8. La configuración se llama redundancia de bajo nivel o diseño redundante.

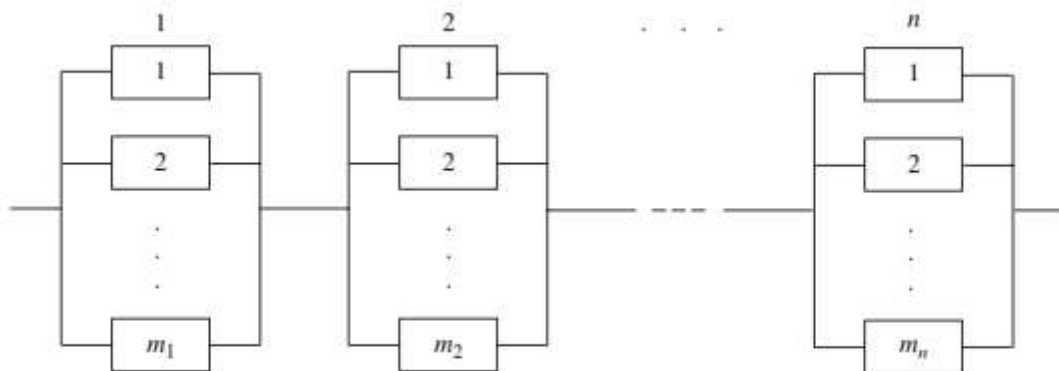


Fig 8 Sistema general Serie - Paralelo



Fig 9 Diagrama de bloques equivalente a la figura 8

Para el cálculo de la fiabilidad del sistema, que primero reducimos cada subsistema paralelo a un bloque de fiabilidad equivalente. A partir de (9.10), la fiabilidad del bloque i es

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij}) \quad (9.15)$$

Donde R_{ij} es la fiabilidad del componente j en el subsistema

i ; $i = 1, 2, \dots, n$ y $j = 1, 2, \dots, m$

Cuando un bloque constituye un sistema en serie equivalente al sistema original, como se muestra en la Figura 9. Entonces se obtiene la fiabilidad del sistema R a partir de (9.1) y (9.15) como

$$R = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij}) \right] \quad (9.16)$$

Cuando todos los componentes en el sistema de serie-paralelo son idénticos y el número de los componentes de cada subsistema es igual, (9.16) simplifica a

$$R = [1 - (1 - R_0)^m]^n \quad (9.17)$$

Donde R_0 es la fiabilidad de un componente individual y m es el número de componentes de cada subsistema.

9.4.3.2. SISTEMAS DE PARALELO-SERIE

Un sistema general paralelo-serie consta de m subsistemas en paralelo con

n ($i = 1, 2, \dots, m$) Componentes en el subsistema de E , como se muestra en la Figura 10. La configuración es también conocido como el diseño de la redundancia de alto nivel. Para el cálculo de la fiabilidad del sistema, que primero hay que llevar cada subsistema de serie a una fiabilidad equivalente. A partir de (9.1) la fiabilidad R_i del bloque i es

$$R_i = \prod_{j=1}^{m_i} (R_{ij}) \quad i = 1, 2, 3 \dots, m, \quad (9.18)$$

Donde R_{ij} es la fiabilidad del componente j en el subsistema de bloques i . cuando un sistema paralelo se lleva a un sistema en paralelo equivalente, como se muestra en la Figura 11. Sustituyendo (9.18) en (9.10) la fiabilidad del sistema de paralelo-serie se evalúa como

$$R = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^{n_i} R_{ij} \right] \quad (9.19)$$

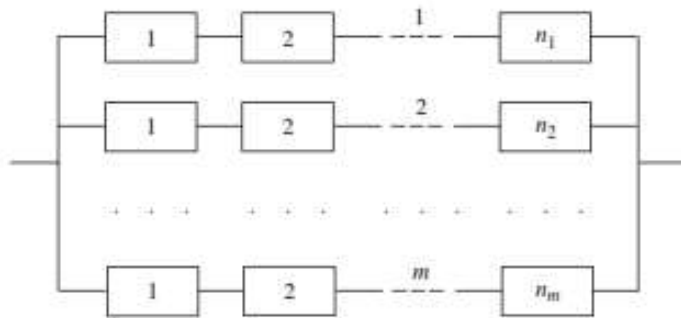


Fig 10 Sistema general Paralelo - Series

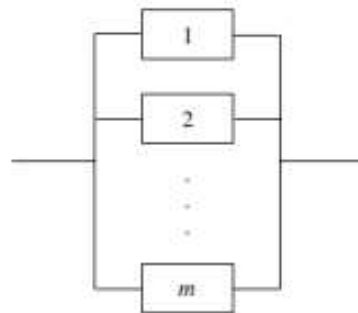


Fig 11 Equivalencia de la fiabilidad de diagramas de bloques de la figura 10

Si todos los componentes en el sistema paralelo-serie son idénticos y el número de componentes de cada subsistema es igual, la fiabilidad del sistema se puede escribir como

$$R = 1 - (1 - R_0^n)^m \quad (9.20)$$

Donde R_0 es la fiabilidad de un componente individual y n es el número de componentes de cada subsistema de la serie.

Ejemplo 9.4: Supongamos que un ingeniero se le dan cuatro componentes idénticos, cada uno que tiene 90% de fiabilidad en la vida de diseño. El ingeniero quiere elegir el diseño del sistema que tiene una fiabilidad más alta de entre la serie-paralelo y paralelo-series,

con configuraciones paralelas. Los dos con figuraciones se muestran en las figuras 12 y 13. ¿Qué diseño debe el ingeniero seleccionar desde la perspectiva de la fiabilidad?

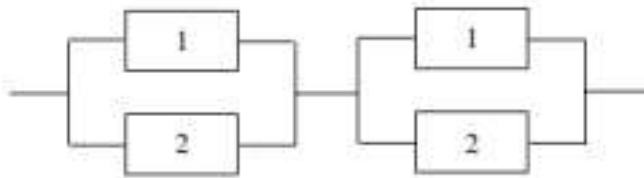


Fig 12 Diseño Serie - Paralelo

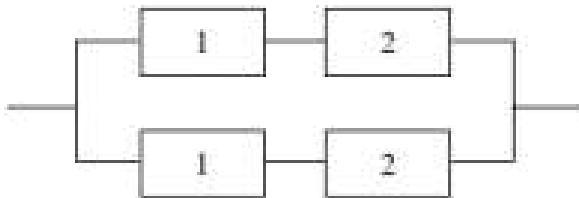


Fig 13 Diseño Paralelo - Serie

SOLUCIÓN A partir de (9.17), la fiabilidad del diseño de la serie-paralelo es

$$R = [1 - (1 - 0.9)^2]^2 = 0.9801$$

A partir de (9.20), la fiabilidad del diseño paralelo-serie es

$$R = 1 - (1 - 0.9^2)^2 = 0.9639$$

Obviamente, el diseño de la serie-paralelo debe ser elegido. En general, la fiabilidad de un sistema de serie-paralelo es mayor que la de un sistema paralelo-serie si ambos utilizan el mismo número de componentes. Para ilustrar esta declaración numéricamente, ver Figura 13, parcelas las fiabilidades de los dos sistemas frente a la fiabilidad de los componentes para diferentes combinaciones de los valores de m y n . En la figura 14, S-P corresponde a la serie-paralelo y P-S sistema paralelo-serie. Se ve que la diferencia entre las fiabilidades, es considerable si el componente de fiabilidad es bajo. Sin embargo, delta disminuye a medida que aumenta la fiabilidad de los componentes y se vuelve insignificante cuando es muy alta, por ejemplo 0,99.

Figura 14 también indica que, dado el mismo número de componentes, un sistema con $n > m$ tiene una menor fiabilidad de uno con $m > n$.

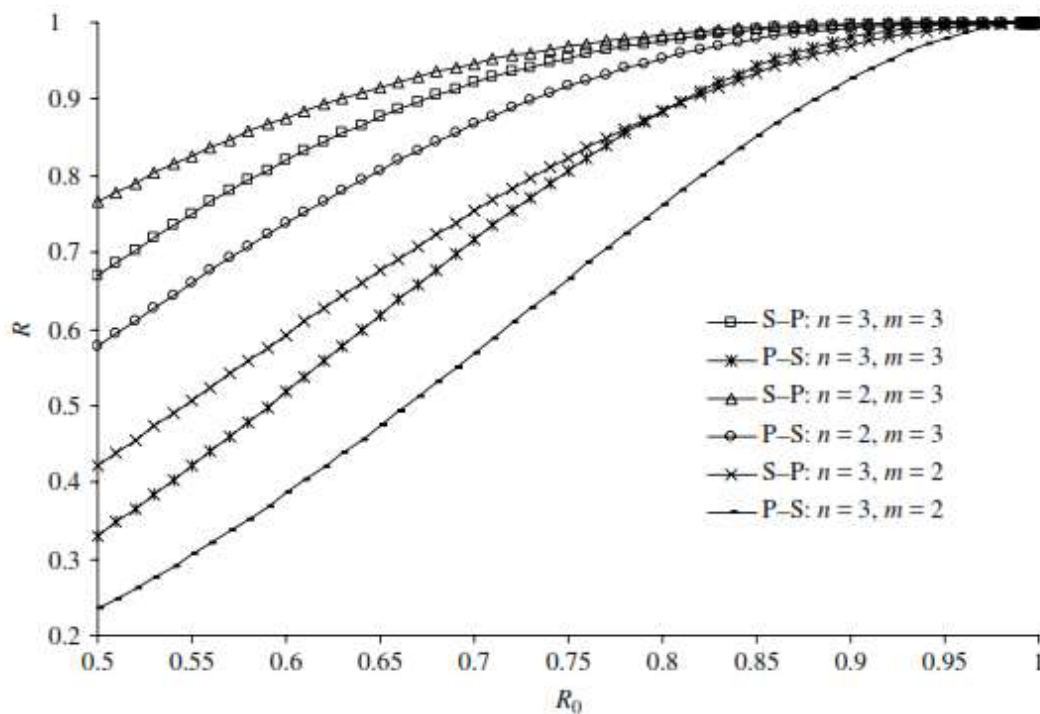


Fig 14. Fiabilidad del sistema entre Paralelo - serie y Serie - Paralelo

9.4.4. K-OUT – OF-N. SISTEMAS DE G

Tal como se presenta en la sección 9.4.2, un sistema paralelo es operacionalmente exitoso si al menos un componente funciona. En realidad, existen sistemas que requieren más de un componente para tener éxito con el fin de que todo el sistema funcione. Tales sistemas se encuentran a menudo. Un sistema de generación de energía que consta de cuatro generadores de trabajo en un modo de reducción de potencia puede requerir al menos dos generadores para operar, en el modo completo simultáneamente para entregar suficiente poder final al cliente. Los servidores de Internet pueden ser instalados con cinco servidores; al menos tres de ellos debe de funcionar para que el servicio web no se interrumpa. En un sistema de posicionamiento equipado con cinco sensores, se requiere un mínimo de tres sensores que puedan funcionar para determinar la ubicación de un objeto. Los sistemas de este tipo se denominan generalmente como la k-fuera-de-n: Sistemas de G, donde n es el número total de componentes en el sistema, k es el número mínimo de n componentes que deben funcionar para que el sistema funcione con éxito y G es sinónimo de "bueno", lo que significa éxito. Por la definición, un sistema paralelo es un 1-fuera-de-n: Sistema G, mientras que un sistema de la serie es un n-fuera-de-n: sistema de G. A veces, podemos estar interesados a la hora de definir un sistema en términos de fracaso. Un sistema es conocido como K-fuera-de-n: Sistema F, donde F es

sinónimo de "fracaso", si y sólo si el fracaso de al menos k componentes hace que el sistema n -componentes falle. Siguiendo esta definición, un sistema paralelo es un n -fuera-de- n : sistema de M , y un sistema de serie es un 1 -fuera-de- n : Sistema F . Aparentemente, un k -fuera-de- n : Sistema G es equivalente a $n - k + 1$: Sistema F . Debido a la relación de equivalencia, en este capítulo se estudia sólo el k -out de n : Sistema G .

Supongamos que los tiempos hasta el fallo de n componentes en una k -out-de- n : sistema G se distribuyen de forma independiente e idénticamente. Sea x el número de componentes operacionales en el sistema. Entonces x es una variable aleatoria y sigue la distribución binomial. La probabilidad de tener exactamente k componentes operacionales es

$$\Pr(x = k) = C_n^k R_0^k (1 - R_0)^{n-k} \quad k = 0, 1, \dots, n, \quad (9.21)$$

Donde R_0 es la fiabilidad de un componente.

Puesto que para que k -out-of- n : sistema G sea operable requiere al menos k componentes funcionales, la fiabilidad del sistema R es

$$\Pr(x \geq k) = \sum_{i=k}^n C_n^i R_0^i (1 - R_0)^{n-i} \quad (9.22)$$

Cuando $k = 1$, es decir, los n componentes están en paralelo, (9.22) se convierte en

$R = 1 - (1 - R_0)^n$. Esto es lo mismo que (9.11). Cuando $k = n$, que es, a continuación, los componentes están en serie, (9.22) puede escribirse como $R = R_0^n$. Esto es idéntico a (9.2). Si el tiempo hasta la falla es exponencial, la fiabilidad del sistema es

$$R(t) = \sum_{i=k}^n C_n^i e^{-\lambda i t} (1 - e^{-\lambda})^{n-i} \quad (9.23)$$

Donde λ es la tasa de fallo de un componente. Mientras tanto al fracaso del sistema es

$$MTTF = \int_0^\infty R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=k}^n \frac{1}{i} \quad (9.24)$$

Tenga en cuenta que (9.24) y (9.14) son los mismos cuando $k = 1$.

Ejemplo 9.5: Un proveedor de alojamiento web a cinco servidores independientes e idénticos conectados en paralelo. Al menos tres de ellos debe operar con éxito para el servicio web no debe ser interrumpido. El servidor de la vida se modela con la distribución exponencial

con $\lambda = 2,7 \times 10^{-5}$ fallos por hora. Calcular el tiempo medio entre fallos

(MTBF) y la fiabilidad de la red de acogida después de un año de servicio continuo.

SOLUCIÓN El proveedor de alojamiento web es un 3-out-of-5: Sistema G. Si se repara un servidor que ha fallado

Inmediatamente a una buena-como-nueva condición, el MTBF es el mismo que el MTTF y se puede calcular a partir de (9.24) como

$$MTBF = \frac{1}{2,7 \times 10^{-5}} \sum_{i=3}^5 \frac{1}{i} = 2,9 \times 10^4 \text{ horas}$$

Sustituyendo los datos dados en (9.23) se obtiene la fiabilidad de la red de acogida en

8760 horas (un año) como

$$R(8760) = \sum_{i=3}^5 C_5^i e^{-2,7 \times 10^{-5} \times 8760 i} (1 - e^{-2,7 \times 10^{-5} \times 8760})^{5-i} = 0,9336$$

Como se discutió anteriormente, un 1-out-of-n: Sistema G es un sistema paralelo puro. En general, una k-out-of-n: sistema de G se puede transformar en un sistema paralelo que consta de C_k^n caminos cada uno con k diferentes componentes. Para ilustrar esta transformación consideramos un 2-out-of-3: Sistema G. El sistema paralelo equivalente tiene $C_2^3 = 3$ trayectorias paralelas, y cada camino tiene dos componentes. El diagrama de bloques fiabilidad del sistema en paralelo se muestra en la Figura 15. Con la notación ha definido en la Sección 9.4.4, la probabilidad de fallo del sistema paralelo se puede escribir como

$$F = \Pr(\overline{E_1 E_2} \cdot \overline{E_1 E_3} \cdot \overline{E_2 E_3}) = \Pr[(\bar{E}_1 + \bar{E}_2) \cdot (\bar{E}_1 + \bar{E}_3) \cdot (\bar{E}_2 + \bar{E}_3)]$$

Mediante el uso de las reglas booleanas esta ecuación se simplifica

$$F = \Pr(\overline{E_1} \cdot \overline{E_2} + \overline{E_1 E_3} + \overline{E_2 E_3}) \quad (9.25)$$

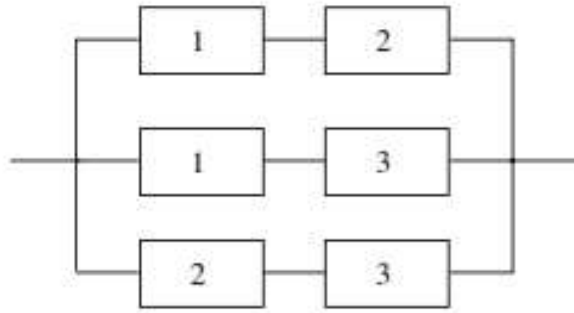


Fig 15 Diagrama de bloques equivalente en un sistema G de 2-out-of-3

La ecuación indica que el sistema falla si cualquiera de los tres eventos ocurre,

$\bar{E}_1 \times \bar{E}_2$, $\bar{E}_1 \times \bar{E}_3$, o $\bar{E}_2 \times \bar{E}_3$. El evento se llama un corte mínimo establecido. La definición y aplicación del corte mínimo establecido se presenta en la Sección 4.8 y se discuten en el capítulo 6. Como se muestra en (9.25), un 2-out-of-3: Sistema de G tiene tres conjuntos mínimos de corte, y cada una contiene dos elementos. En general, a k-of-n: G sistema que contiene C_n^{n-k+1} conjuntos de corte mínimos y cada uno consta de exactamente k elementos.

Vamos a continuar con el cálculo de la probabilidad de fallo. La ecuación (9.25) se puede ampliar a

$$F = \Pr(\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_2) + \Pr(\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_3) + \Pr(\bar{E}_2 \cdot \bar{E}_3) - 2\Pr(\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_2 \cdot \bar{E}_3)$$

Desde E1, E2, y E3, son mutuamente independientes, la fiabilidad del sistema se puede escribir como

$$\begin{aligned} R &= 1 - F \\ &= 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) - (1 - R_1)(1 - R_3) - (1 - R_2)(1 - R_3) \\ &\quad + 2(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \end{aligned} \quad (9.26)$$

Si los componentes son idénticos y tienen una fiabilidad común R_0 se convierte en

$$R = 1 - (1 + 2R_0)(1 - R_0)^2$$

La fiabilidad es el mismo que el obtenido a partir de (9.22). Tenga en cuenta que a diferencia de (9.22), (9.26) no requiere los componentes que ser idénticos con el fin de calcular la fiabilidad del sistema. Por lo tanto, la transformación de un k-fuera-de-n: Sistema G para un sistema paralelo equivalente proporciona un método para el cálculo de la fiabilidad del sistema para los casos en que las fiabilidades de los componentes son desiguales.

9.4.5. SISTEMAS REDUNDANTES

Un sistema redundante contiene uno o más componentes o subsistemas de reserva. Estas unidades de reserva permitirán que el sistema pueda continuar la función cuando la unidad principal falla. El fallo del sistema se produce sólo cuando algunas o todas las unidades de reserva fallan. Por lo tanto, la redundancia es una técnica de diseño para que el sistema pueda aumentar la fiabilidad. Dicha técnica se utiliza ampliamente en sistemas críticos. Un ejemplo sencillo es un automóvil equipado con un neumático de repuesto. Cada vez que falla un neumático, se reemplaza con la rueda de repuesto de modo que el vehículo es todavía manejable. Un ejemplo más complicado se describe en W. Wang y Loman (2002). Una planta de energía diseñada por General Electric consta de n generadores activos y uno de reserva. Normalmente, cada uno de los n generadores funciona a $100(n - 1) / n$ por ciento de su plena carga y en conjunto de alimentación de carga 100% a los usuarios, donde $n - 1$ generadores pueden cubrir completamente la carga. Cuando al menos uno de los generadores entra en falla, los restantes $n - 1$ generadores compensará la pérdida de potencia tal que la salida sigue siendo 100%. Mientras tanto, el generador de reserva se activa para compensar la carga y por ende la fiabilidad, mientras que el que entra en falla es reparado para volver a funcionar y no permitir que se genere una cadena de fallas.

Si una unidad redundante está trabajando completamente a full carga o energía, la redundancia se denomina espera activa.

Para los sistemas k-fuera-n: G descritos en los apartados anteriores son ejemplos típicos de sistemas de espera activa. Si una unidad redundante es totalmente energizada sólo cuando la unidad principal falla, la redundancia se conoce como modo de espera pasiva. Cuando la unidad principal opera con éxito, la unidad redundante se puede mantener en reserva. Una unidad de este tipo se dice que está en modo de espera en frío. Un sistema de reserva en frío necesita un mecanismo de detección para detectar un fallo del grupo primario y un actuador de conmutación para activar la unidad redundante cuando se produce un fallo. En la siguiente discusión se utiliza el término de conmutación para el sistema de detección y actuador de conmutación. Por otro lado, si la unidad redundante se carga parcialmente en un período de espera, la redundancia se denomina que está en un tipo de espera activa. Una unidad de reserva en caliente o activa por lo general se somete a una reducción del nivel de estrés y puede fallar antes de que esté completamente su activación. De acuerdo con el esquema de clasificación anterior, la rueda de repuesto y generadores redundantes descritos anteriormente están en espera en frío. En el resto de esta sección se consideran los sistemas de reserva en frío con un sistema de conmutación perfecta o imperfecta. La Figura 16 muestra un sistema de espera en frío que consiste en n componentes y un sistema de conmutación; en esta figura, el componente 1 es el componente principal y S representa el sistema de conmutación

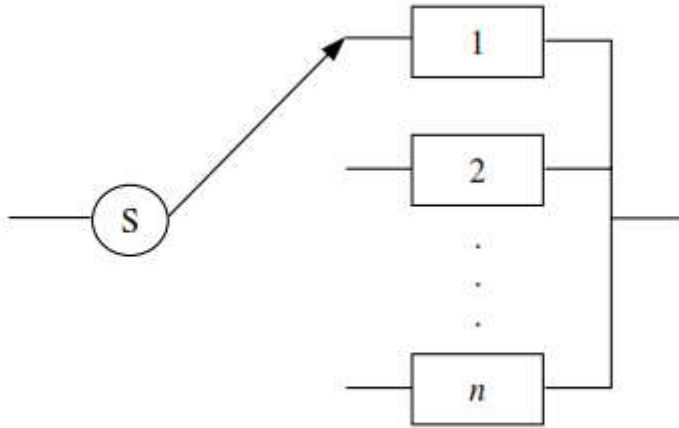


Fig 16

Sistema de reserva en frío

Sistemas de espera en frío con un sistema de conmutación perfecto

Si el sistema de conmutación es 100% fiable, la fiabilidad del sistema se determina por los componentes n , Sea T el tiempo hasta el fallo del componente i

($i = 1, 2, \dots, n$) y T denota todo el sistema. Obviamente

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (9.27)$$

Si T_1, T_2, \dots, T_n están distribuidos independientemente y de forma exponencial con λ tasa de fracaso, T sigue una distribución gamma con parámetros n y λ . La función de densidad de probabilidad (pdf) es:

$$f(t) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} t^{n-1} e^{-\lambda t} \quad (9.28)$$

Donde $\Gamma(*)$ es la función gamma, La fiabilidad del sistema es

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} t^{n-1} e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \quad (9.29)$$

El tiempo medio al fracaso del sistema viene dada por la distribución gamma como

$$MTTF = \frac{n}{\lambda} \quad (9.30)$$

Alternativamente, (9.30) también se pueden derivar a partir de (9.27). Específicamente,

$$MTTF = E(T) = \sum_{i=1}^n E(T_i) = \sum_{i=1}^n \frac{n}{\lambda} = \frac{n}{\lambda}$$

Si sólo hay un componente de espera, se obtiene la fiabilidad del sistema a partir de (9.29) estableciendo $n = 2$. Entonces tenemos

$$R(t) = (1 + \lambda t)e^{-\lambda} \quad (9.31)$$

Ejemplo 9.6: Una pequeña planta de energía está equipada con dos generadores idénticos, uno activo y el otro en espera en frío. Cuando falla el generador activo, el generador redundante se cambia a condiciones de trabajo sin interrupción. La vida de los dos generadores puede ser modelada con la distribución exponencial con $\lambda = 3,6 \times 10^{-5}$ fallos por hora. Calcular la fiabilidad de la planta de potencia a 5000 horas y el tiempo medio hasta el fallo.

SOLUCIÓN Sustituyendo los datos en (9.31) se obtiene

$$R(5000) = (1 + 3.6 \times 10^{-5} \times 5000)e^{-3.6 \times 10^{-5} \times 5000} = 0.9856$$

Al establecer $n = 2$ en (9.30), obtenemos que, mientras tanto el fracaso como

$$MTTF = \frac{2}{3.6 \times 10^{-5}} = 5.56 \times 10^4 \text{ horas}$$

Si los componentes de n no son de forma idéntica y exponencialmente distribuido, el cálculo de la fiabilidad del sistema es bastante complicada. Ahora vamos a considerar un caso sencillo en el que el sistema de reserva fría se compone de dos componentes. El sistema va a sobrevivir el tiempo t si se presenta cualquiera de los dos eventos siguientes:

El componente principal (cuya vida es T) no falla en el tiempo t , es decir, $T_1 \geq t$. Si el componente principal falla en el tiempo τ ($\tau < t$), el componente de espera en frío (cuya vida es T) sigue la función y no falla en el tiempo restante ($T - \tau$). Probabilísticamente, el evento es descrito por $(T_1 < t) * (T_2 \geq t - \tau)$

Puesto que los dos eventos anteriores son mutuamente excluyentes, la fiabilidad del sistema es

$$R(t) = \Pr[(T_1 \geq t) + (T_1 < t) \cdot (T_2 \geq t - \tau)] = \Pr(T_1 \geq t) + \Pr[(T_1 < t) \cdot (T_2 \geq t - \tau)]$$

$$= R_1(t) + \int_0^t f_1(\tau)R_2(t - \tau)] \quad (9.32)$$

donde R_i y F_i son, respectivamente, la fiabilidad y el pdf del componente i . En la mayoría de las situaciones, la evaluación de (9.32) requiere un método numérico. Como un caso especial, cuando los dos componentes se distribuyen de forma idéntica y de manera exponencial, (9.32) puede resultar en (9.31).

Sistemas de espera en frío con un Sistema de Conmutación Imperfecto

Un sistema de conmutación consiste en un mecanismo de detección de fallos y un actuador de conmutación, y por lo tanto puede complicarse en la naturaleza. En la práctica, está sujeta a la falta. Ahora consideramos un sistema de espera en frío de dos componentes. Mediante la modificación de (9.32), podemos obtener la fiabilidad del sistema como

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t R_0(\tau)f_1(\tau)R_2(t - \tau)d\tau \quad (9.33)$$

donde $R_0(\tau)$ es la fiabilidad del sistema de conmutación en τ tiempo. En la siguiente discusión asumimos que los dos componentes se distribuyen de forma idéntica y de forma exponencial con el parámetro λ , y se ocupan de dos casos en los que $R_0(\tau)$ es estática o dinámica.

Para algunos sistemas de conmutación, tales como los operadores humanos, la fiabilidad no se puede cambiar con el tiempo. En estas situaciones, $R_0(\tau)$ es estática o independiente del tiempo. Deje que $R_0(\tau) = p_0$. Entonces (9.33) se puede escribir como

$$R(t) = e^{-\lambda t} + p_0 \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau = (1 + p_0 \lambda t) e^{-\lambda t} \quad (9.34)$$

Obsérvese la similitud y la diferencia entre (9.31) para un sistema perfecto de conmutación y (9.34) para una imperfecta. La ecuación (9.34) se reduce a (9.31) cuando $p_0 = 1$. El tiempo medio entre fallos del sistema es

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt = \frac{1 + p_0}{\lambda} \quad (9.35)$$

Ahora tenemos en cuenta la situación en la que $R_0(\tau)$ es dinámica o dependiente del tiempo. La mayoría de los sistemas de conmutación modernos contienen tanto de hardware como de software y son complicados

en naturaleza. Ellos pueden fallar en diferentes modos antes de que los componentes primarios fallen. Si se produce tal fallo, las componentes de espera nunca serán activados para llevar a cabo la función de los componentes primarios fallidos. Dado que los sistemas de conmutación se deterioran con el tiempo, es realista asumir que

la fiabilidad de tales sistemas es una función del tiempo. Si la vida de un sistema de conmutación se distribuye de forma exponencial con el parámetro λ_0 , a partir de (9.33) la fiabilidad de todo el sistema es

$$R(t) = e^{-\lambda t} + \int_0^t e^{-\lambda_0 \tau} \lambda e^{-\lambda t} e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau = e^{-\lambda t} \left[1 + \frac{\lambda}{\lambda_0} (1 - e^{-\lambda_0 t}) \right]$$

Tiempo medio al fracaso es

$$MTTF = \int_0^\infty R(t) dt = \frac{1}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda_0} - \frac{\lambda}{\lambda_0(\lambda + \lambda_0)} \quad (9.37)$$

Como se muestra en el Ejemplo 9.7, un sistema de conmutación imperfecto reduce la fiabilidad y *MTTF* de todo el sistema. Para ayudar a entender mejor esto, primero denotamos a r_0 como la relación de la fiabilidad en el tiempo de $1/\lambda$ en un sistema de conmutación imperfecto, y en un sistema perfecto como r_1 .

La relación de la *MTTF* en un sistema de conmutación imperfecta con un sistema perfecto, está dada por δ que es la proporción de λ a λ_0 . A continuación, a partir de (9.31) y (9.36), tenemos

$$r_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \delta (1 - e^{-\frac{1}{\delta}}) \right] \quad (9.38)$$

A partir de (9.30) con $n = 2$ y (9.37), obtenemos

$$r_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \delta \left(1 - \frac{\delta}{1 + \delta} \right) \right] \quad (9.39)$$

Figura 17 se muestra el diagrama de r_0 y r_1 para varios valores de δ . Puede verse que la falta de fiabilidad del sistema de conmutación tiene efectos más fuertes sobre *MTTF* que en la fiabilidad de todo el sistema. Ambas cantidades se reducen en gran medida cuando λ_0 es mayor que 10% de λ . Los efectos se alivian por la disminución de λ_0 , y se convierten casi insignificantes cuando λ_0 es menos de 1% de λ .

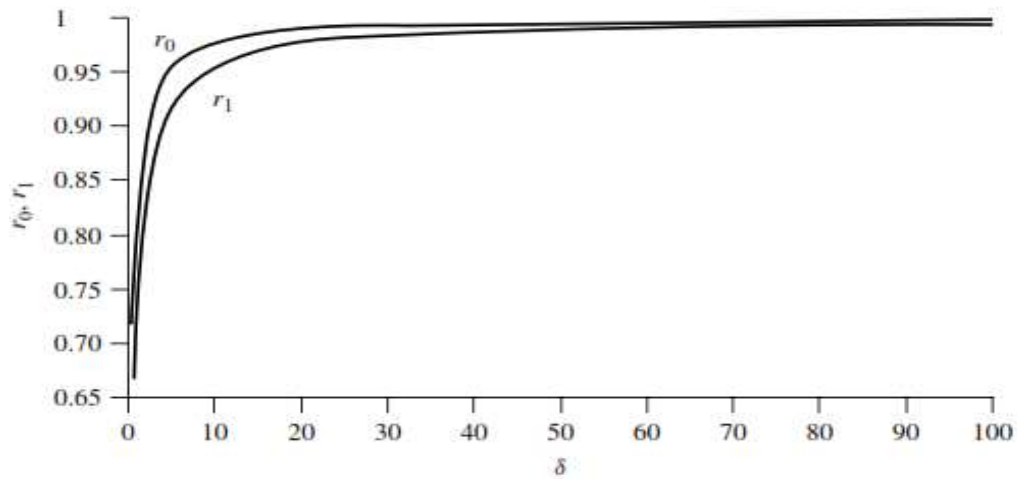


FIG 17 Diagrama de r_0 y r_1 para diferentes valores de λ

Ejemplo 9.7: Retomando el ejemplo 9.6 Supongamos que el sistema de conmutación está sujeta al fracaso después de la distribución exponencial con $\lambda_0 = 2,8 \times 10^{-5}$ fallos por hora. Calcular la fiabilidad de la planta de potencia a 5000 horas y el tiempo medio hasta el fallo.

SOLUCIÓN Sustituyendo los datos para (9.36) se obtiene

$$R(5000) = e^{-3.6 \times 10^{-5} \times 5000} \left[1 + \frac{3.6 \times 10^{-5}}{2.8 \times 10^{-5}} (1 - e^{-2.8 \times 10^{-5} \times 5000}) \right] = 0.9756$$

Mientras tanto la tasa media al fracaso se obtiene a partir de (9.37) como

$$\begin{aligned} MTTF &= \frac{1}{3.6 \times 10^{-5}} + \frac{1}{2.8 \times 10^{-5}} - \frac{3.6 \times 10^{-5}}{2.8 \times 10^{-5} (3.6 \times 10^{-5} + 2.8 \times 10^{-5})} \\ &= 4.34 \times 10^4 \text{ horas} \end{aligned}$$

Comparando estos resultados con los del Ejemplo 9.6, observamos los efectos adversos del sistema de conmutación imperfecto.

CAPITULO X

10. METODOLOGIAS PARA LA VALORACION Y ASIGNACION DE LA CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS Y SISTEMAS

Hasta ahora hemos estudiado la serie, paralelo, serie-paralelo, paralelo - serie, k-fuera de n, y sistemas redundantes. En realidad, estas configuraciones se combinan frecuentemente y formar sistemas más complejos con el fin de requerimientos funcionales. Algunas redes, como las redes de suministro de energía, sistemas de telecomunicaciones y redes de computación, son tan complicados en su estructura que no

pueden ser fácilmente descompuestos en dichas configuraciones. La evaluación de fiabilidad de los sistemas complejos requiere más métodos avanzados. En esta sección se presentan tres enfoques simples pero potentes. Para los sistemas complejos a gran escala, el cálculo manual de fiabilidad se dificulta. Varios paquetes de software comerciales, tales como Reliasoft, son capaces de calcular la fiabilidad y otras medidas de fiabilidad de los sistemas complejos a través de la simulación.

10.1. MÉTODO DE REDUCCIÓN

Algunos sistemas se componen de series independientes, paralelos, serie-paralelos, paralelos - de series, k-fuera-de-n, y subsistemas redundantes. El método de reducción del sistema es colapsar un sistema secuencial en los subsistemas anteriores, cada uno representado por un bloque de fiabilidad equivalente.

El diagrama de bloques de fiabilidad es reducido hasta que todo el sistema está representado por un solo bloque. El método se ilustra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 10.1 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de ingeniería en la Figura 18. Los tiempos a los fallos de los componentes se modelan con la distribución exponencial con las tasas de fallo como se muestra en los bloques correspondientes con una multiplicación de 10^{-4} fallos por hora. Calcular la fiabilidad del sistema en 600 horas de tiempo de misión.

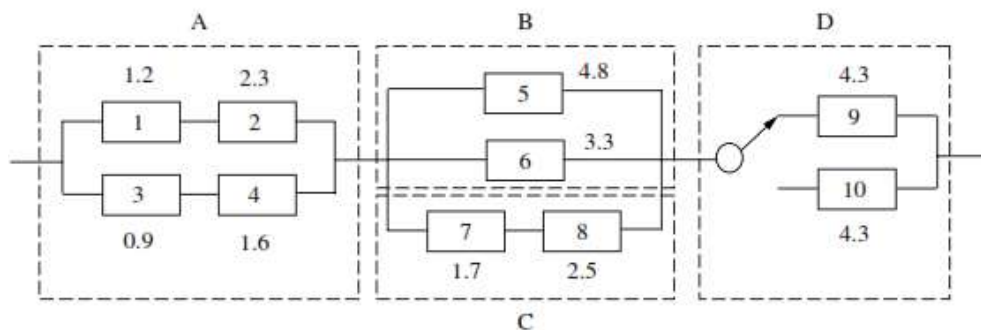


FIG 18 sistema de ingeniería del ejemplo 10.1

Solución Los pasos para el cálculo de la fiabilidad del sistema son los siguientes:

Descomponer el sistema en bloques A, B, C, y D, que representan una Paralelo-serie, paralelo, serie y subsistema de reserva en frío, respectivamente, como se muestra en la Figura 18

Calcular las fiabilidades de los bloques A, B, C y D. A partir de (9.19), la fiabilidad del bloque A es

$$\begin{aligned}
 R_A &= 1 - (1 - R_1 R_2)(1 - R_3 R_4) \\
 &= 1 - [1 - e^{-(1.2+2.3) \times 10^{-4} \times 600}][1 - e^{-(0.9+1.6) \times 10^{-4} \times 600}] = 0.9736
 \end{aligned}$$

A partir de (9.10), la fiabilidad del bloque B es:

$$R_A = 1 - (1 - R_5)(1 - R_6)$$

$$= 1 - [1 - e^{-4.8 \times 10^{-4} \times 6}] \quad [1 - e^{-3.3 \times 10^{-4} \times 600}] = 0.955$$

De (9.1) se obtiene la fiabilidad del bloque C como

$$R_C = e^{-(1.7+2.5) \times 10^{-4} \times 600} = 0.7772$$

A partir de (9.31) la fiabilidad del bloque D es:

$$R_D = (1 + 4.3 \times 10^{-6} \times 600) x e^{-4.3 \times 10^{-4} \times 600} = 0.9719$$

El diagrama de bloques equivalente se muestra en la Figura 19

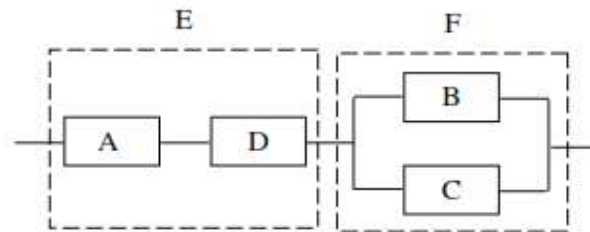


FIG 19 Sistema equivalente reducido de la figura 18

El sistema equivalente en la figura 19 se reduce aún más a los bloques E y F, que son series y subsistemas paralelos, respectivamente

Calcular las fiabilidades de los bloques E y F.

$$R_E = R_A R_D = 0.9736 \times 0.9719 = 0.9462$$

$$R_F = 1 - (1 - R_B)(1 - R_C) = 1 - (1 - 0.955)(1 - 0.7772) = 0.99$$

El diagrama de bloques de fiabilidad equivalente a la figura 19 se muestra en la Figura 20.

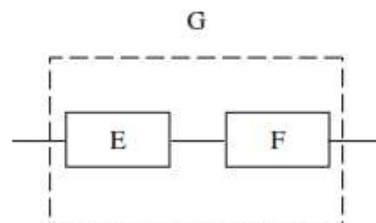


FIG 20 Sistema equivalente reducido de la figura 19

El sistema equivalente en la figura 20 se compone de dos unidades en serie. Es reducido a un solo bloque, G.

Se calcula la fiabilidad del bloque G.

$$R_G = R_E R_F = 0.9462 \times 0.99 = 0.9367$$

Ahora que el sistema original se ha reducido a una sola unidad, como se muestra en Figura 21, el proceso de reducción se ha agotado. A continuación, la fiabilidad del sistema es

$$R = R_G = 0.9367$$

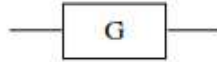


FIG 21 Sistema equivalente de la figura 20 (max reduccion)

10.2. MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN

El método de reducción es un sistema eficaz cuando un sistema complejo puede ser fraccionado en un número de subsistemas simples cuyas fiabilidades son directamente asequibles. En algunas situaciones nos encontramos con sistemas más complejos, tales como el sistema conocido puente, mostrado en la figura 22, que no puede ser resuelto por el método de reducción. En esta subsección se presenta un método de descomposición conocido también como el enfoque de probabilidad condicional o método teorema de Bayes.

El método de descomposición comienza con la elección de un componente de distorsión trapezoidal, digamos A, desde el sistema en estudio. Este componente parece unirse al sistema en conjunto. En la figura 22, por ejemplo, el componente 5 es un componente trapezoidal. El componente de distorsión trapezoidal se supone que es 100% fiable y se sustituye con una línea en la estructura del sistema. A continuación, el mismo componente se supone que han fallado y se retira del sistema. La fiabilidad del sistema se calcula en cada supuesto. De acuerdo con la regla de la probabilidad total, la fiabilidad del sistema original se puede escribir como

$$R = P_r(\text{Buen sistema} \mid A)P_r(A) + P_r(\text{Buen sistema} \mid \bar{A})P_r(\bar{A}) \quad (10.1)$$

donde A es el caso de que el componente de distorsión trapezoidal A es 100% fiable, Un caso de que el componente de distorsión trapezoidal \bar{A} ha fallado, $P_r(\text{buen sistema} \mid A)$ la probabilidad de que el sistema está funcionando dado que el componente A nunca falla, y $P_r(\text{buen sistema} \mid \bar{A})$ la probabilidad de que el sistema está funcionando dado que componente \bar{A} ha fallado. La eficiencia del método depende de la selección del componente de distorsión trapezoidal. Una elección apropiada del componente conduce a un cálculo eficiente de las probabilidades condicionales.

Ejemplo 10.1 Considere el sistema de puente en la Figura 22. Supongamos que la fiabilidad del componente i es R, i = 1, 2, ..., 5. Se calcula la fiabilidad del sistema.

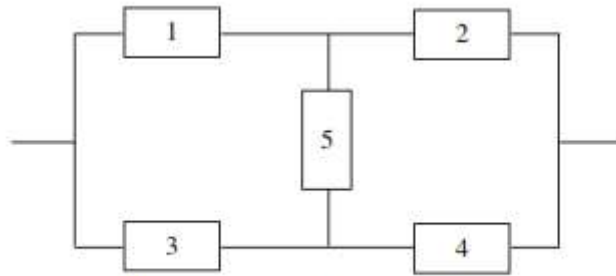


FIG 22 Sistema de puente

SOLUCIÓN el componente 5 es elegido como el componente de distorsión trapezoidal, denota A. Supongamos que nunca falla y se sustituye por una línea en el aire configuración del sistema.

A continuación, el sistema se reduce como se muestra en la Figura 23. El sistema de reducción es una estructura de serie-paralelo, y la fiabilidad condicional es

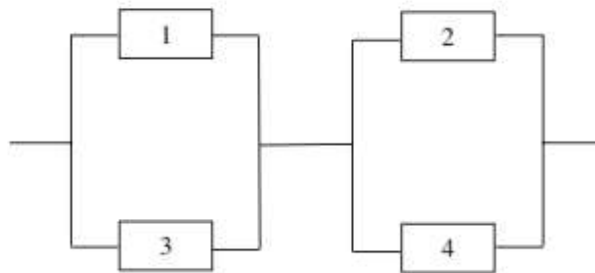


FIG 23 Sistema de puente cuando el bloque 5 nunca falla

$$P_r(\text{Buen sistema} \mid A) = [1 - (1 - R_1)(1 - R_3)][1 - (1 - R_2)(1 - R_4)]$$

El siguiente paso es asumir que el componente 5 ha fallado y se elimina de la estructura del sistema. La figura 24 muestra la nueva configuración, que es un sistema -series paralelo. La fiabilidad condicional es

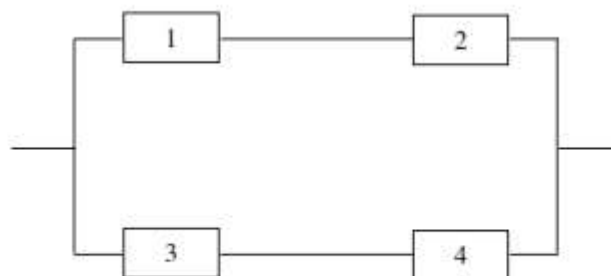


FIG 24 Sistema de puente cuando el bloque 5 falla

$$P_r(\text{Buen sistema} \mid \bar{A}) = 1 - (1 - R_1 R_2)(1 - R_3 R_4)$$

La fiabilidad y la falta de fiabilidad de los componentes son 5

$Pr(A) = R_5$ y $Pr(\bar{A}) = 1 - R_5$, respectivamente. Sustituyendo las ecuaciones de arriba en (9.40) proporciona la fiabilidad del sistema original como

$$\begin{aligned} R &= [1 - (1 - R_1)(1 - R_3)][1 - (1 - R_2)(1 - R_4)]R_5 \\ &\quad + [1 - (1 - R_1R_2)(1 - R_3R_4)](1 - R_5) \\ R &= R_1R_2 + R_3R_4 + R_1R_4R_5 + R_2R_3R_5 - R_1R_2R_4R_5 - R_2R_3R_4R_5 - R_1R_2R_3R_5 \\ &\quad - R_1R_3R_4R_5 - R_1R_2R_3R_4 + 2R_1R_2R_3R_4R_5 \quad (10.2) \end{aligned}$$

Como se ilustra en el Ejemplo 10.1, el cálculo de la fiabilidad del sistema de puente necesita la selección de sólo un componente de distorsión trapezoidal, y la ecuación (10.1) se aplica una vez.

Para algunos sistemas complejos, las fiabilidades de los sistemas descompuestos no se pueden escribir directamente. En estas situaciones, podemos seleccionar los componentes adicionales en forma trapezoidal y aplicar la ecuación (10.1), sucesivamente hasta que cada término de la ecuación sea fácil de obtener. Por ejemplo, si $Pr(\text{buen sistema} | A)$ no se puede resolver de inmediato, tomamos sistema donde A falla, igualmente mediante la selección de un componente de distorsión trapezoidal adicional, por ejemplo B. Aplicando (10.1) a Keystone componente B, podemos escribir la fiabilidad del sistema original como

$$\begin{aligned} R &= P_r(\text{Buen sistema} | A \cdot B)P_r(A)P_r(B) + P_r(\text{Buen sistema} | A \cdot \bar{B})P_r(A)P_r(\bar{B}) \\ &\quad + P_r(\text{Buen sistema} | \bar{A})P_r(\bar{A}) \quad (10.3) \end{aligned}$$

El método de descomposición que se discutió anteriormente selecciona uno de los componentes de distorsión trapezoidal a la vez. W. Wang y Jiang (2004) sugieren que varios de estos componentes se elegirán de forma simultánea para algunas redes complejas. Por ejemplo, si dos componentes trapezoidales, dicen A y B, se selecciona, el sistema original se descompone en cuatro subsistemas con las condiciones

$((A \cdot B)(\bar{A} \cdot B)(A \cdot \bar{B})y(\bar{A} \cdot \bar{B}))$ respectivamente, donde $A \cdot B$ es el caso de que ambos A y B se encuentran funcionando, $\bar{A} \cdot B$ es el caso de que A no está funcionando y B si, $A \cdot \bar{B}$ es el caso de que A está funcionando y B no, y $\bar{A} \cdot \bar{B}$ es el caso de que ambos A y B no están funcionando. Mediante la aplicación de la regla de la probabilidad total, la fiabilidad del sistema original se puede escribir como

$$\begin{aligned} R &= P_r(\text{Buen sistema} | A \cdot B)P_r(A)P_r(B) + P_r(\text{Buen sistema} | \bar{A} \cdot B)P_r(\bar{A})P_r(B) \\ &\quad + P_r(\text{Buen sistema} | A \cdot \bar{B})P_r(A)P_r(\bar{B}) \\ &\quad + P_r(\text{Buen sistema} | \bar{A} \cdot \bar{B})P_r(\bar{A})P_r(\bar{B}) \quad (10.4) \end{aligned}$$

La ecuación (10.4) tiene cuatro términos. En general, para componentes binarios, si los componentes M Keystone se seleccionan simultáneamente, la ecuación de fiabilidad contiene términos 2^m . Cada término es el producto de la fiabilidad de uno de los subsistemas descompuestos y la de la condición en la que se forma el subsistema.

10.3. MÉTODO DE CONFIGURACIÓN DE CORTE MÍNIMO

El método de descomposición estudiado anteriormente se basa en la regla de probabilidad total. En esta subsección se presenta un enfoque para la evaluación de la fiabilidad del sistema utilizando un conjunto de corte mínimo y la regla de inclusión-exclusión. Primero vamos a discutir conjuntos de corte. Un conjunto de corte es un conjunto de componentes cuya falla interrumpe todas las conexiones entre los extremos de entrada y salida y provoca así un fallo total del sistema. En la figura 22, por ejemplo, {1, 3, 5} y {2, 4} son conjuntos cortados. Algunos juegos de corte pueden contener componentes innecesarios. Si se elimina, el fallo de los componentes restantes ocasiona un fallo del sistema. En el ejemplo anterior, el conjunto de corte {1, 3, 5} contiene el componente 5, que se puede eliminar del conjunto de corte sin cambiar el estado de fallo del sistema. Tales conjuntos de corte pueden reducirse adicionalmente para formar conjuntos de corte mínimos. Un conjunto de corte mínimo es la combinación más pequeña de componentes donde si todos fallan hará que el sistema falle. Un conjunto de corte mínimo representa la colección más pequeña de componentes cuyos fallos son necesarios y suficientes para provocar fallos del sistema. Si se elimina cualquier componente del conjunto, los componentes restantes colectivamente ya no son un conjunto de corte. Las definiciones del conjunto de corte y del conjunto de corte mínimo son similares a las definidas en el análisis del árbol de fallas. Puesto que cada conjunto de corte mínimo hace que el sistema falle. La fiabilidad del sistema puede ser escrito como

$$R = 1 - P_r(C_1 + C_2 \dots + C_n) \quad (10.5)$$

Donde C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) representa un evento mínimo de los componentes, El conjunto de corte i representa un estado de fallo y n es el número total de conjuntos de corte mínimo. La ecuación (10.5) se puede evaluar aplicando la regla de inclusión-exclusión, que es

$$\begin{aligned} & P_r(C_1 + C_2 + \dots + C_n) \\ &= \sum_{i=1}^n P_r(C_i) - \sum_{i < j=2}^n P_r(C_i \cdot C_j) + \sum_{i < j < k=3}^n P_r(C_i \cdot C_j \cdot C_k) + \dots \\ & \quad + (-1)^{n-1} P_r(C_1 \cdot C_2 \dots \cdot C_n) \end{aligned} \quad (10.6)$$

Ejemplo 10,2 Véase el Ejemplo 10,1. Si los cinco componentes son idénticos y Tienen una fiabilidad común R_0 , calculan la fiabilidad del sistema de puente mostrado En la Figura 22 utilizando el método de ajuste de corte mínimo.

SOLUCIÓN Los conjuntos de corte mínimo del sistema de puente son $\{1, 3\}$, $\{2, 4\}$, $\{1, 4, 5\}$ y $\{2, 3, 5\}$, Ahí denotan el evento de que el componente i ha fallado, $I = 1, 2, \dots, 5$. Entonces los eventos descritos por los conjuntos de corte mínimo se pueden escribir como $C_1 = A_1 \cdot A_3$, $C_2 = A_2 \cdot A_4$, $C_3 = A_1 \cdot A_4 \cdot A_5$, y $C_4 = A_2 \cdot A_3 \cdot A_5$. De (10.5) y (10.6) Y usando las reglas del álgebra booleana, la confiabilidad del sistema se puede escribir como








$$\begin{aligned}
 R &= 1 - \left[\sum_{i=1}^4 \Pr(C_i) - \sum_{i < j=2}^4 \Pr(C_i \cdot C_j) + \sum_{i < j < k=3}^4 \Pr(C_i \cdot C_j \cdot C_k) \right. \\
 &\quad \left. - \Pr(C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4) \right] \\
 &= 1 - [\Pr(A_1 \cdot A_3) + \Pr(A_2 \cdot A_4) + \Pr(A_1 \cdot A_4 \cdot A_5) + \Pr(A_2 \cdot A_3 \cdot A_5) \\
 &\quad - \Pr(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4) - \Pr(A_1 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5) - \Pr(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_5) \\
 &\quad - \Pr(A_1 \cdot A_2 \cdot A_4 \cdot A_5) - \Pr(A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5) + 2\Pr(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5)] \\
 &= 1 - [2(1 - R_0)^2 + 2(1 - R_0)^3 - 5(1 - R_0)^4 + 2(1 - R_0)^5] \\
 &= 2R_0^5 - 5R_0^4 + 2R_0^3 + 2R_0^2.
 \end{aligned}$$

10.4. MÉTODO DEL ÁRBOL DE FALLOS

El método de árbol de fallos es gráfico y ayuda para describir las combinaciones de eventos que conducen a un fallo del sistema definido. En la terminología del árbol de fallos, el modo de fallo del sistema se conoce como el evento superior. El árbol de fallas implica esencialmente tres posibilidades lógicas y por lo tanto dos símbolos principales. Éstos implican puertas tales que las entradas debajo de las puertas representan fallas. Las salidas (en la parte superior) de las compuertas representan una propagación del fallo dependiendo de la naturaleza de la compuerta.

Como se ha definido anteriormente, un árbol de fallas es una representación gráfica de relaciones lógicas Entre sucesos de falla. Así, un árbol de fallas puede ser visto como un sistema de eventos y Símbolos lógicos. Los símbolos de eventos indican si los eventos son normales, independientes o insignificantes. La Figura 25 muestra los símbolos de eventos más comúnmente usados y sus valores. Los símbolos se pueden describir como sigue:

FIG 25 Simbología del arbol de fallas

Nombre	Simbolo del Evento	Descripcion
Circulo		Evento basico con datos suficientes
Rectangulo		Evento representado por una puerta
Rombo		Evento sin desarrollar
Ovalo		Evento condicional
Casa		Evento inicial
Triangulo de entrada		Transferencia de entrada
Triangulo de salida		Transferencia de salida

Círculo: es un evento básico que no requiere más desarrollo. Representa el tipo de eventos en el nivel más bajo y por lo tanto indica la terminación de la ramificación del árbol. La información de confiabilidad de los eventos debe estar disponible para el análisis cuantitativo de un árbol de fallas.

Rectángulo: es un evento intermedio que se puede desarrollar más. Denota un evento que resulta de una combinación de eventos más básicos a través de puertas lógicas.

Rombo: es un evento no desarrollado, no se desarrolla debido a que sus consecuencias de fallo son insuficientes o porque no se dispone de la información necesaria para un mayor desarrollo.

Ovalo: es un evento condicional que se utiliza junto con otras puertas lógicas, como las puertas lógicas (descritas más adelante).

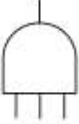

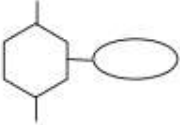


Casa: es un evento externo, que no es en sí mismo un fallo, y se espera que provoque un evento de salida. El evento inicial es encendido o apagado artificialmente para examinar varios casos especiales de árboles de fallas.

Triangulo de entrada: es un símbolo que indica que el árbol se desarrolla en otra parte (por ejemplo, en otra página). Se utiliza en un par con un triángulo de salida

Triangulo de salida: un símbolo que indica que esta porción del árbol debe ser conectada al triángulo de entrada correspondiente

Los símbolos lógicos representan gráficamente las puertas utilizadas para interconectar los eventos de bajo nivel que contribuyen al evento de nivel superior según sus relaciones causales. Una puerta puede tener uno o más eventos de entrada, pero sólo un evento de salida. La Figura 26 muestra los símbolos lógicos utilizados con frecuencia. A continuación, se describen los significados de los símbolos.

FIG 26 Compuertas y simbolos logicos del alrbol de fallos

Nombre	Simbolo del evento	Descripcion
Compuerta AND		El evento de salida se produce si todos los elementos de entrada se activan.
Compuerta OR		El evento de salida se produce si un solo elemento de entrada se activa.
Compuerta INHIBIT		El evento de salida se produce cuando en la entrada sucede un evento condicional
Compuerta exclusiva OR		El evento de salida se produce si solo se produce uno de los eventos de entrada.
Compuerta VOTING		El evento de salida ocurre si solo al menos k de n eventos ocurren.

Compuerta AND: Se produce un evento de salida si todos los eventos de entrada ocurren simultáneamente

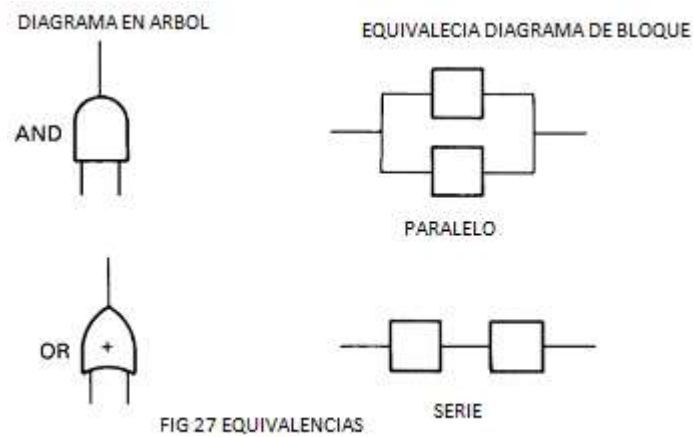
Compuerta OR: Se produce un evento de salida si ocurre uno o más de los eventos de entrada.

Compuerta INHIBIT: La entrada produce salida sólo cuando se satisface una determinada condición. Se utiliza en un par con el símbolo del evento condicional. Una compuerta INHIBIT es un tipo especial de puerta AND

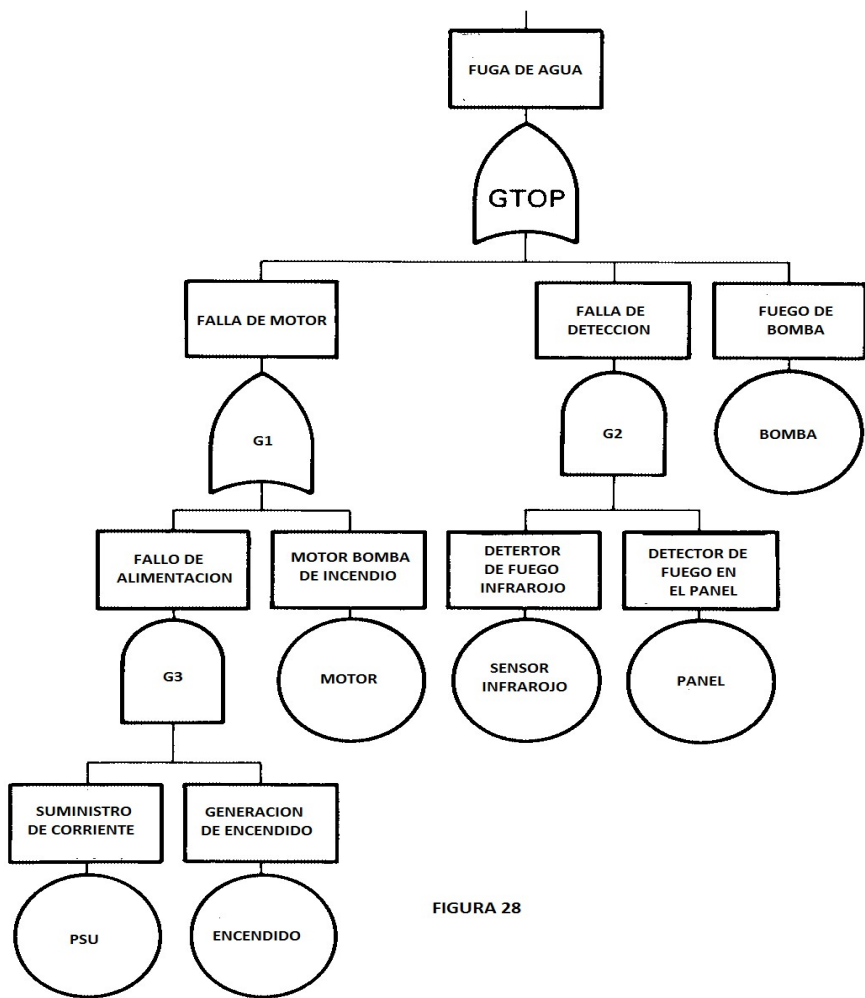
Compuerta exclusiva OR: Los eventos de entrada causan un evento de salida si sólo se produce uno de los eventos de entrada. El evento de salida no se producirá si se produce más de un evento de entrada. Esta compuerta puede ser reemplazada por la combinación de puertas AND y puertas OR.

Compuerta VOTING: Los eventos de entrada producen un evento de salida si ocurren al menos k de n eventos de entrada.

Equivalencias de compuertas y diagrama de bloques figura 27



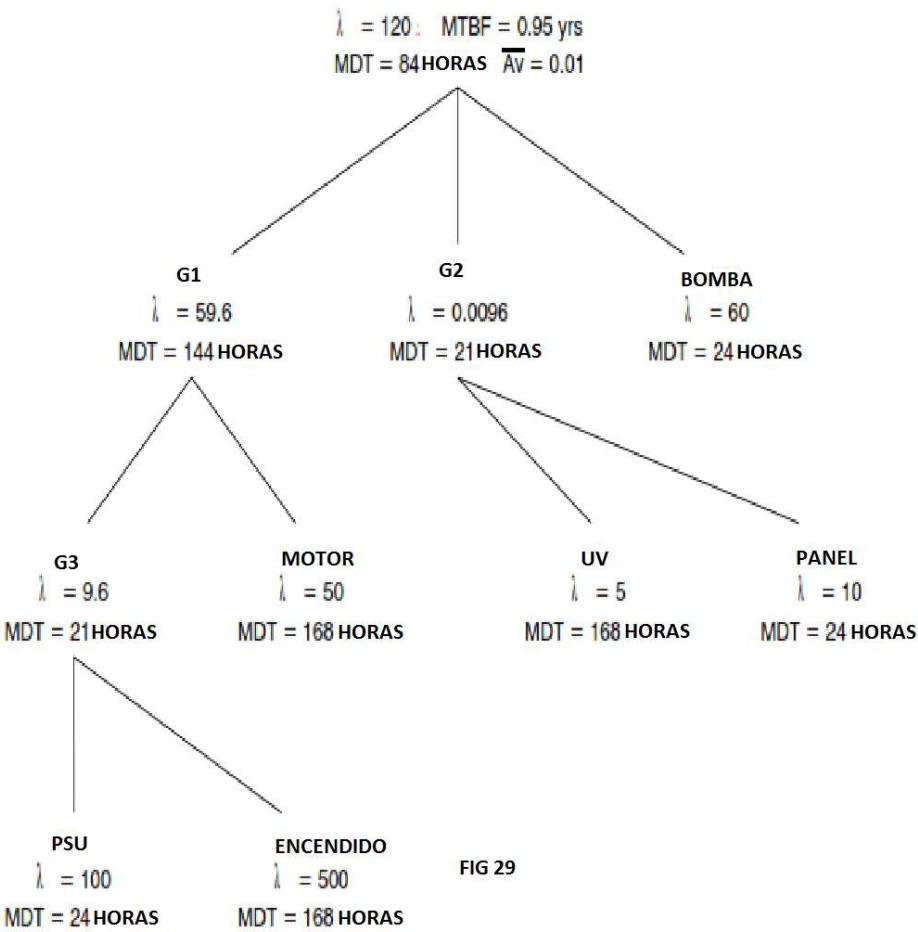
Se construye un árbol de fallas como se muestra en la figura 28



Después de haber modelado la lógica de fallos, para un sistema, como un árbol de fallos, el siguiente paso es evaluar la frecuencia del evento superior. Al igual que con el análisis de diagrama de bloques, esto se puede realizar, para los diagramas de árbol. El ejemplo mostrado en la figura 28 podría evaluarse como sigue. Suponga que los siguientes datos de eventos básicos

Componentes	Tasa de fallos en (PMH)	MDT (Horas)
PSU	100	24
Encendido	500	168
Motor	50	168
Sensor	5	168
Panel	10	24
Bomba	60	24

Las "salidas" de velocidad de fallo de las compuertas AND G2 y G3 se pueden obtener de la fórmula $\lambda_1 \times \lambda_2 \times (MDT_1 + MDT_2)$ Cuando una compuerta AND es realmente una compuerta VOTING, por ejemplo, dos de tres, Las salidas de las puertas OR G1 y GTOP pueden obtenerse sumando las tasas de fallo de las entradas. La Figura 29 tiene la tasa de fracaso y valores de MDT mostrados.



$$\frac{(21 \times 9.6) + (168 \times 50)}{(9.6 + 50)} = 144 \text{ Horas}$$
$$\frac{(24 \times 168)}{(24 + 168)} = 21 \text{ Horas}$$

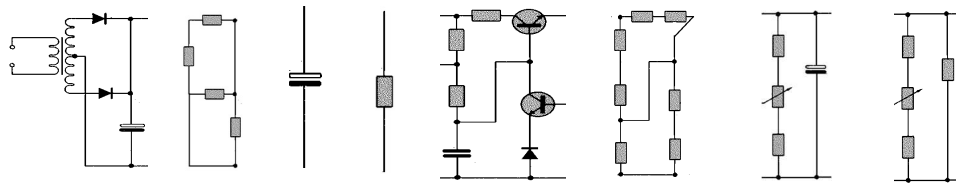
11. METODOLOGIA Y PASOS PARA LA VALORACION Y ASIGNACION DE CONFIABILIDAD EN UN EQUIPO ELECTRONICO

[illegible]

Esta fuente tiene protección contra las sobrecargas en el circuito de salida. El punto de disparo del sistema de protección, formado por Q2, está determinado por el ajuste de P1. La fuente emplea un transformador de 9 + 9V y proporciona corrientes hasta de 200 mA.

Según la teoría de corte mínimo, el circuito electrónico para una fuente protegida se fracciona en cuatro partes de estudio, donde cada corte hallaremos la probabilidad de falla y por ende la de todo el circuito

11.3 LLEVAMOS CADA CORTE A SU EQUIVALENTE EN DIAGRAMA



11.4 HALLAMOS LA TASA DE FALLO DE CADA ELEMENTO SEGÚN SU MODELO

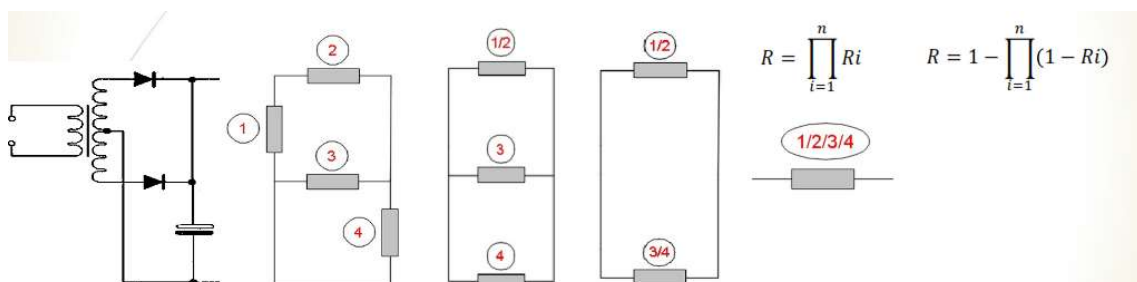
Componente	Metodo	Formula
Transformador	Factor de diseño	$TF = 0,00005 [FALLAS/UNIDAD * HORA]$
Diodo	Ruptura en el dielectrico	
Capasitor	Ciclo de temperatura	$Nf = A_0 [1/\Delta\epsilon \rho]^B$
Transistor	Inyeccion de corriente a alta temperatura	$TF = B(I_{Sub})^N * \exp[Ea/kT]$
Resistencia	Corrosion	$TF = Co * RH^2 * f(v) * \exp[E_{um}/kT]$
Pista	Electromigracion	$TF = A0 (J - J_{Crit})^{-N} * \exp[Ea/kT]$



$$\lambda = 0.8 * 10^{-6} \quad \lambda = 0.5 * 10^{-6} \quad \lambda = 0.4 * 10^{-5} \quad \lambda = 0.5 * 10^{-5} \quad \lambda = 0.8 * 10^{-4} \quad \lambda = 0.5 * 10^{-7}$$

11.5 HALLAMOS LA FIABILIDAD DE CADA CORTE Y DEL CIRCUITO

CORTE 1



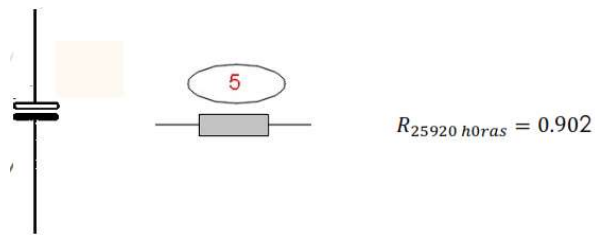
$$\textcircled{1/2} R_{25920 \text{ horas}} = 0.813$$

$$\textcircled{3/4} R_{25920 \text{ horas}} = 0.990$$

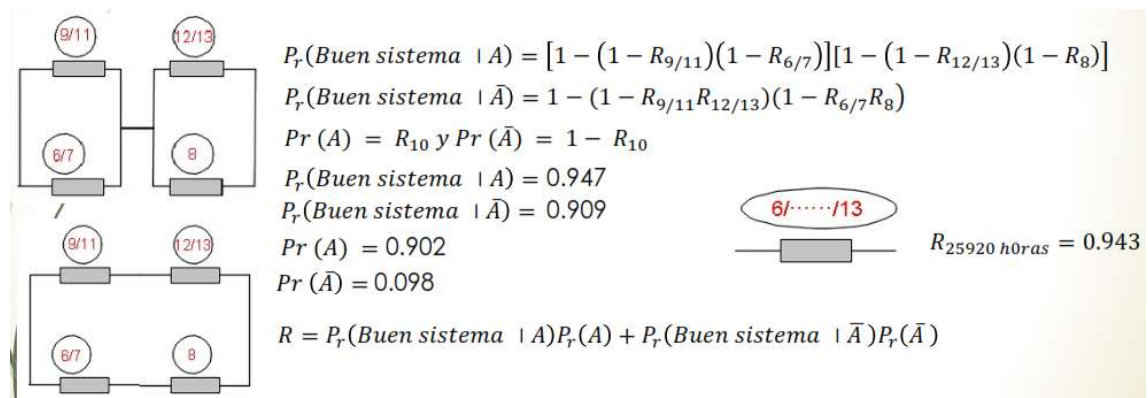
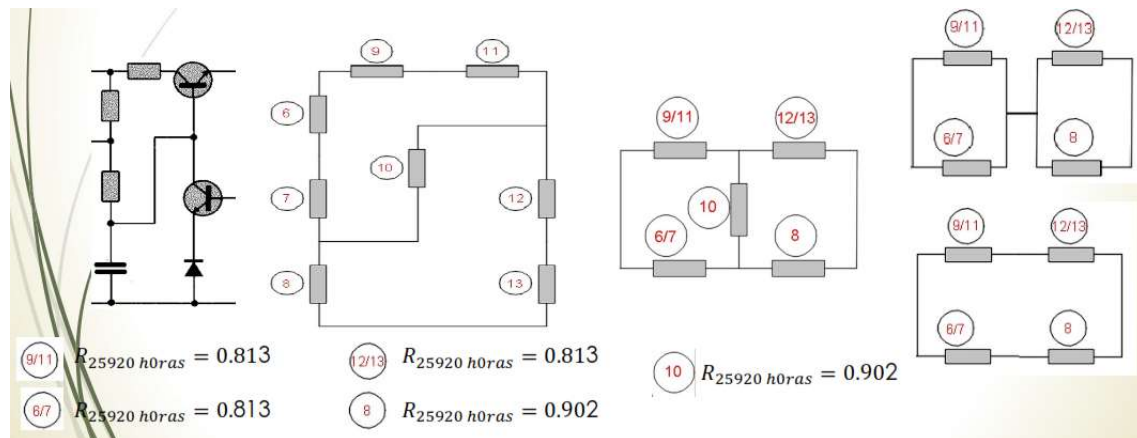
$$\textcircled{1/2/3/4}$$

$$R_{25920 \text{ horas}} = 0.998$$

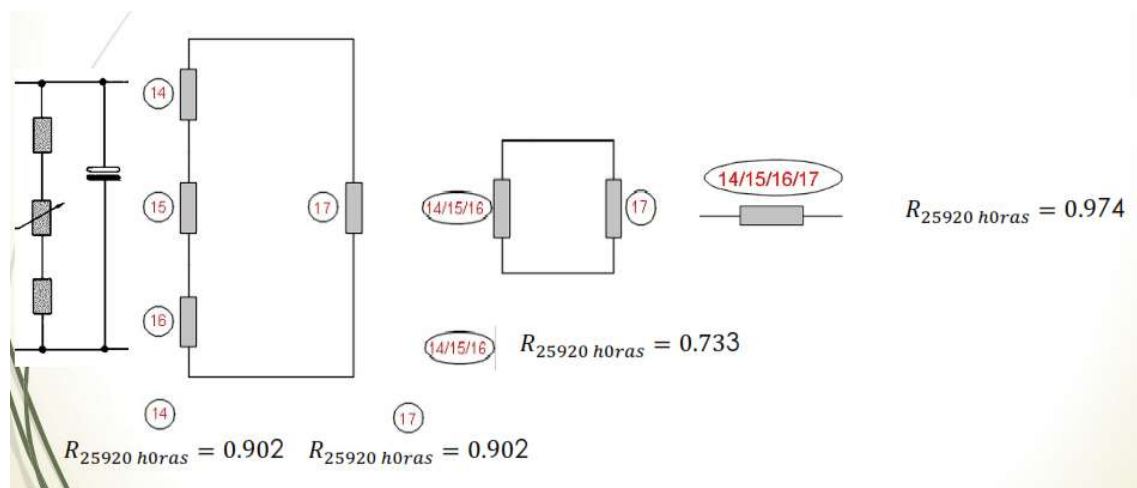
CORTE 2



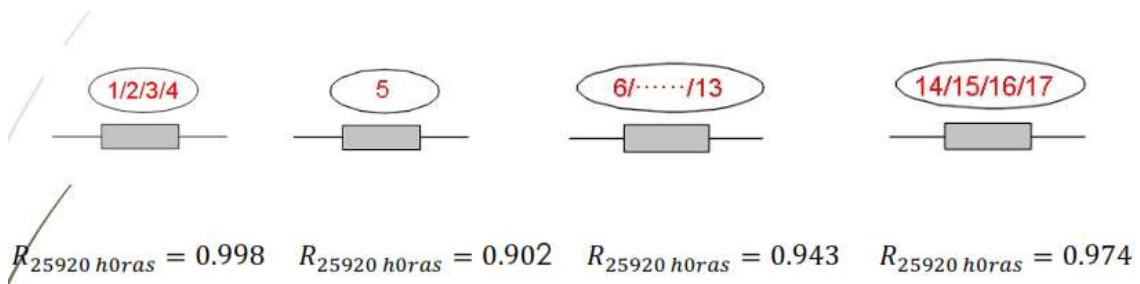
CORTE 3




CORTE 4



FIABILIDAD DEL CIRCUITO



FIABILIDAD DEL SISTEMA


$$R_{25920 \text{ horas}} = 0.827$$
$$R_{(t)} = 82,7\%$$

12. CONCLUSIONES

Se estudió el avance de la tecnología y sus métodos de aplicación en nuestras vidas, y de antemano observamos la necesidad de tener una buena confiabilidad en nuestros sistemas electrónicos, como llevar estos sistemas a ser confiables, y pronosticar el uso adecuado para nosotros.

Se comprendió cuáles son los factores principales que más afecta un circuito electrónico, debido a lo anterior se estudiaron las metodologías de diseño que les realizan a los elementos electrónicos que componen un sistema, tanto químicos como físicos para establecer por medio de fórmulas matemáticas la vida útil de cada componente electrónico.

Al conocer los factores que más influyen en un componente desde su realización y los protocolos de diseño, llevarlo a pruebas aceleradas de vida, y compararlas con las metodologías estocásticas y probabilísticas que se usan actualmente para determinar los ciclos de vida antes de un fallo se observó que estas metodologías son acertadas para definir los periodos útiles.

Aunque en algunos casos estas metodologías estocásticas y determinísticas pueden quedar cortas debido al avance tan rápido en la electrónica, hay sistemas electrónicos que debido a su complejidad quedarían cortos para ser evaluados por los métodos anteriormente relacionados y por lo tanto se necesitaría de programas o software que utilizan métodos numéricos para determinar los ciclos de vida útil de un equipo.

CAPITULO XII

13. BIBLIOGRAFÍA

[1]. Military Handbook (1998). Electronic Reliability Design Handbook, MIL-HDBK-338B Department of defense, Washington.

[2]. P.V. Varde. Physics-of-Failure Based Approach for Predicting Life and Reliability of Electronics Components. En: BARC NEWSLETTER [en línea]. ISSUE NO 313 (MAR. - APR. 2010)

<<http://www.barc.gov.in/publications/nl/2010/2010030406.pdf>> [citado en 18 febrero 2013]

[3]. Xppower. Reliability in Electronics [en línea]. <<http://www.xppower.com/pdfs/Reliability.pdf>> [citado el 18 febrero 2013].

[4]. White Mark & Joseph B. Bernstein (2008) “Microelectronics reliability: Physics-of-Failure based modelling and Lifetime evaluation, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, JPL publication

[5]. RICHARDBlish, NOELDurrant. Semiconductor Device Reliability Failure Models. En: International SEMATECH [en línea]. No. 00053955A-XFR (Mayo 31, 2000)

<<http://www.semtech.org/docubase/document/3955axfr.pdf>>[citado en 18 de febrero 2013]

[6]. J. A. McInn, Constant failure rate—a paradigm in transition. Quality and Reliability Engineering International, vol. 6, pp. 237–241, 1990.

[7]. J. B. Bowles. A survey of reliability-prediction procedures for microelectronic devices,” IEEE

Transactions on Reliability, vol. 41, pp. 2–12, March 1992.

[8]. M. G. Pecht and F. R. Nash, “Predicting the reliability of electronic equipment,” Proceedings

of the IEEE, vol. 82, pp. 992–1004, July 1994.

[9]. Military Handbook (1991) Reliability Prediction of Electronic Equipment, MIL-HDBK-217F Department of defense, Washington

[10]. IEEE STANDARDS COORDINATING COMMITTEE 37. Guide for Selecting and Using Reliability Predictions Based on IEEE 1413™: Reliability Prediction. (12 September 2012) ISBN 0-7381-3364-7 SS95020.

[11]. Standards and Definitions Committee of the IEEE Reliability Society. Standard Methodology for Reliability Prediction and Assessment for Electronic Systems and Equipment. (08 December 1998). ISBN 0-7381-1552-5 SS94714

- [12]. Arsenault, J.E., and J.A., Roberts, "Reliability and Maintainability of Electronic Systems," Computer Science Press, Potomac, MD, 1980.
- [13]. Weber, W, (1998). Dynamic stress experiments for understanding hot carrier degradation phenomenon. *IEEE Transactions on Electronics Devices*, Vol. 35, pp1476-1486.
- [14]. J. McPherson, "Accelerated Testing," *Electronic Materials Handbook, Volume 1, Packaging,* ASM International Publishing, p. 887 (1989).
- [15]. B. Foucher, J. Boullie, B. Meslet, and D. Das, "A review of reliability prediction methods for electronic devices," *Microelectronics Reliability*, vol. 42, pp. 1155–1162, Aug 2002.
- [16]. X. Li, J. Qin, B. Huang, X. Zhang, and J. B. Bernstein, "SRAM circuit-failure modeling and reliability simulation with SPICE," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 2, no. 2, pp. 235–246, 2006.
- [17]. JEDEC, *Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices*. JEDEC Solid State Technology Association, 2003.
- [18]. G. Ribes, S. Bruyere, F. Monsieur, D. Roy, and V. Huard, "New sights into the change of voltage acceleration and temperature activation of oxide breakdown," *Microelectronics Reliability*, vol. 43, pp. 1211–1214, 2003.
- [19]. J.-C. Lin, S.-Y. Chen, H.-W. Chen, Z.-W. Jhou, H.-C. Lin, S. Chou, J. Ko, T.-F. Lei, and H.-S. Haung, "Investigation of dc hot-carrier degradation at elevated temperatures for n-channel metal-oxide-semiconductor _eld-e_ecttransistor of 0.13 μ m technology," *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, vol. 45, pp.3144–3146, Apr 2006.
- [20]. Agarwal, K. and Nassif. S.R.: Characterizing process variation in nanometer CMOS, *DAC*, pp.396–399, IEEE (2007).